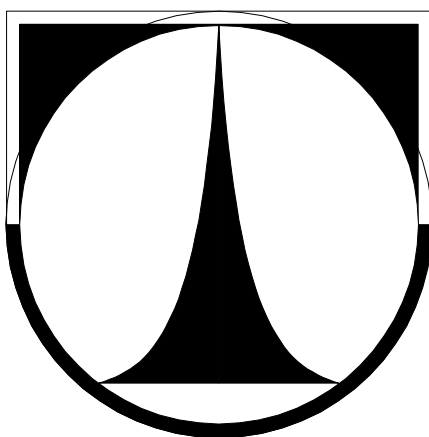


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



**Způsoby náhrady molybdenu v nízkolegovaných  
litinách**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Kyzivát Marek**

**2006**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Katedra materiálů  
obor materiálové inženýrství

### Možnosti náhrady molybdenu v nízkolegovaných litinách

### Possibilities of Mo replacement in low-alloyed casts

Marek Kyzivát

**KMT – B - 122**

Vedoucí bakalářské práce:

doc.Ing. František Stuchlík, CSc.

Konzultant bakalářské práce:

Ing. Hošek Ph.D. – ŠKODA AUTO a.s.

#### **Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	<b>49</b>
<b>Počet tabulek</b>	<b>22</b>
<b>Počet příloh</b>	<b>0</b>
<b>Počet obrázků</b>	<b>12</b>

**Datum:**25.5.2006

**ANOTACE**  
**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**  
**Katedra materiálů**

Studijní program:	M2301 – Strojní inženýrství
Jméno a příjmení:	Marek Kyzivát
Téma bakalářské práce:	Možnosti náhrady molybdenu v nízkolegovaných litinách
Číslo bakalářské práce:	KMT – B - 122
Vedoucí bakalářské práce:	doc.Ing.František Stuchlík, CSc.
Konzultant bakalářské práce:	Ing. Hošek Ph.D. – ŠKODA AUTO a.s.

**Abstrakt:** Cílem bakalářské práce bylo se seznámit s výrobou grafitických litin v Škoda Auto a.s. v případech použití legujících prvků. Jednou z důležitých legur je molybden, který je používán v odlitcích brzdových kotoučů. Molybden zajišťuje dobré mechanické vlastnosti, ovšem jeho nevýhodou je příliš vysoká cena. Bakalářská práce má za úkol prověřit po materiálové stránce odlitky brzdových kotoučů a analyzovat možnosti náhrady molybdenu. Dále pak doporučit další postup výroby brzdových kotoučů a provést technicko ekonomickou analýzu doporučeného postupu.

**Abstract:** The aim of the baccalaureate work is to get acquainted with the production of plumbaginous irons in Škoda Auto Inc. in cases of alloying element use. One of the most important alloying element is molybdenum which is used in casts of brake wheels. Molybdenum ensures good tensile properties but its disadvantage is the fact that it is too expensive. The baccalaureate work should verify the brake wheel casts regarding the material aspect and analyse possibilities of Molybdenum replacement. Furthermore the work will recommend another procedure for brake wheel production and make a technical economic analysis of the recommended procedure.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

- molybden
- litina s lupínkovým grafitem
- nízkolegované litiny
- antimon

## **KEYWORDS**

- molybdenum
- grey cast iron
- low-alloyed casts
- antimony

## **MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci 25.května 2006

.....  
Marek Kyzivát  
Železničářská 1750  
470 01 Česká Lípa

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji všem, kteří mi pomáhali při tvorbě bakalářské práce. Především pak Ing.Hoškovi Ph.D. a panu Šťastnému ze Škody Auto a.s. Dále bych rád poděkoval celé katedře materiálů, zejména doc.Ing. Františku Stuchlíkovi, CSc. - tedy vedoucímu mé bakalářské práce, a Ing.Daniele Odehnalové, která mi rovněž napomáhala cennými radami při zpracování práce.

Největší dík patří mým rodičům za podporu během studia.

## OBSAH

<b>1.</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>10</b>
<b>2.</b>	<b>VÝROBA GRAFITICKÝCH LITIN</b>	<b>11</b>
2.1	Výroba brzdových kotoučů	11
2.2	Vlastnosti brzdových kotoučů	11
2.3	Vlastnosti molybdenu	12
<b>3.</b>	<b>TEORETICKÁ ČÁST</b>	<b>13</b>
3.1	Základní rozdělení litin	13
3.2	Vlastnosti a struktura litin	16
3.2.1	Strukturní složky litin	17
3.2.2	Tuhnutí litin a nukleace grafitu	18
3.2.3	Očkování grafitu	20
3.2.4	Výroba litin	20
3.3	Teorie litiny s lupínkovým grafitem	22
3.3.1	Vlivy jednotlivých legur na vlastnosti litiny s lup.grafitem	23
3.4	Možnosti náhrady molybdenu v nízkolegovaných litinách	28
3.4.1	Rozbor původního složení brzdového kotouče	29
3.4.2	Náhrady cínem a antimonem	30
3.4.3	Náhrada vanadem	31
3.4.4	Náhrada zvýšeným obsahem chrómu	33
3.5	Ekonomický rozbor náhrad	34
<b>4.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</b>	<b>35</b>
4.1	Úvod do experimentální části	35
4.2	Prověření původního brzdového kotouče s legorou Mo	36
4.2.1	Zkouška tvrdosti dle Brinella	36
4.2.2	Zkouška pevnosti mezi klíny	36
4.2.3	Zkouška tahem	37
4.2.4	Metalografický výbrus	38
4.3	Prověření náhrady antimonem	40
4.3.1	Zkouška tvrdosti dle Brinella	41

4.3.2	Zkouška pevnosti mezi klíny	41
4.3.3	Zkouška tahem	42
4.3.4	Metalografický výbrus	42
<b>5.</b>	<b>DISKUSE VÝSLEDKŮ</b>	<b>44</b>
<b>6.</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>45</b>
<b>7.</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY</b>	<b>47</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$\alpha$	- lineární teplotní roztažnost ( $\text{m}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$\rho$	- měrná hmotnost ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
$\lambda$	- tepelná vodivost ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
A	- tažnost (%)
$C_E$	- uhlíkový ekvivalent
E	- modul pružnosti (Mpa)
EIP	- elektrická indukční pec
EOP	- elektrická oblouková pec
F	- tlaková síla (N)
GJL	- litina s lupínkovým grafitem
GJM	- litina s vločkovým grafitem
GJMB	- litina s vločkovým grafitem – černý lom
GJMW	- litina s vločkovým grafitem – bílý lom
GJS	- litina s kuličkovým grafitem
GJV	- litina s červíkovým grafitem
HB	- tvrdost dle Brinella
HV	- tvrdost dle Vickerse
$K_G$	- grafitizační koeficient
$R_e$	- mez kluzu v tahu (Mpa)
$R_m$	- mez pevnosti v tahu (Mpa)
S	- plocha ( $\text{mm}^2$ )
S	- směrodatná výběrová odchylka
$S_E$	- stupeň eutektičnosti
USD	- americký dolar
X	- výběrový aritmetický průměr

# 1. ÚVOD

Slévárství je jednou z nejstarších technologií. První měděné odlitky pochází již z doby 9000 let př.n.l. Již od nepaměti se slévárství používalo k výrobě různých nástrojů, zbraní či ozdob. S postupem doby se využívaly slévané výrobky k výrobě částí strojů a různých konstrukčních dílů.

Dnes je slévárství jednou z hlavních technologií. Neustále dochází k vyvíjení nových technologií, které vedou zejména k přesnému lití bez další nutnosti obrábění či jiného zpracování. Velký rozvoj je zaznamenáván také v oblasti lehkých slitin, zejména hliníkových.

Nejpoužívanějším slévárským materiálem je dnes litina s lupínkovým grafitem. V podstatě až do konce druhé světové války se jednalo o jedinou používanou grafitickou litinu. Tato litina téměř postupně vytlačila oceli na odlitky. Ač je to dnes stále nejběžnější slévárský materiál, tak i on je částečně nahrazován, a to zejména litinou s kuličkovým grafitem, která má vyšší mechanické vlastnosti, a litinou s červíkovým grafitem. Litina s lupínkovým grafitem však stále představuje ve světě přibližně 40 % z objemu výroby slitin na bázi železa. Tento vysoký podíl je dán především tím, že se z litiny vyrábí objemné a těžké výrobky, jako např. stojany strojů, skříně převodovek apod.

Bakalářská práce se zabývá právě litinou s lupínkovým grafitem, které bylo použito ve Škoda Auto a.s. při výrobě odlitku brzdového kotouče. K dosažení mechanických vlastností byla litina legována molybdenem. Cílem bakalářské práce bylo nahrazení molybdenu jinými legurami, které nebudou tak drahé jako je molybden a zajistí stejné mechanické vlastnosti.

## 2. VÝROBA GRAFITICKÝCH LITIN

### 2.1. Výroba brzdových kotoučů

Ve Škodě Auto a.s. se zhotovovaly odlitky brzdových kotoučů z litiny s lupínkovým grafitem. Brzdové kotouče se vyráběly na automatické lince, která byla schopná vyrábět jeden brzdový kotouč za čas 12 s. K odlití taveniny do formy docházelo za 7 s. Odlévací teplota byla okolo 1400 °C. Zhruba polovina množství očkovačů byla přidávána do taveniny a druhá polovina objemu byla vnášena do taveniny přímo při odlévání do formy. Chladnutí odlitku pak probíhalo na dopravníku přibližně po dobu 1 hodiny. Na konci dopravníku, kdy docházelo k vyjmutí odlitku z formy, byla teplota odlitku v teplotním rozmezí 300-400 °C. [3]

### 2.2. Vlastnosti brzdových kotoučů

Brzdový kotouč automobilu je velice mechanicky namáhanou součástí. Dochází u něj k ohřevu. Musí být proto odolný proti opotřebení a mít stálost mechanických vlastností za zvýšených teplot. Rovněž musí být odolný proti otěru. Vlastnosti brzdového kotouče musí odpovídat předepsaným mechanickým vlastnostem. Byla předepsána tvrdost Brinellovou zkouškou na  $195 \pm 25$  HB. Dále pak pevnost v tahu na  $R_m$  180 – 230 Mpa a pevnost mezi klíny 130 – 160 Mpa. Strukturní složení materiálu musí obsahovat 90 % lamelárního perlitu a méně než 10 % feritu [3]. Předepsané chemické složení je uvedené v tabulce č.2.2.

Tab. č.2.2. Chemické složení brzdového kotouče [3]

Legura	C	Si	Mn	S	P
Obsah	3,7-3,8	1,6-1,75	0,5-0,8	0,12	0,03
Legura	Cr	Cu	Ti	Mo	
Obsah	0,15-0,2	0,5-0,7	0,02	0,2-0,35	

Hmotnost odlitku brzdového kotouče byla po odlití téměř 9 kg, průměr kotouče 292 mm a k větrání bylo použito celkem 38 žeber [3]. Předepsané mechanické vlastnosti odlitku brzdového kotouče byly dosaženy pomocí jednotlivých legujících prvků. Hlavním legujícím prvkem byl v tomto případě

molybden. Tento prvek zajišťuje mechanické vlastnosti kotouče, ovšem nevýhodou tohoto prvku je příliš vysoká cena.



*Obr.2.2. Odlitek brzdového kotouče z GJL s legurou molybdenem*

### **2.3. Vlastnosti molybdenu**

Molybden je kov, který krystalizuje v objemově středěné kubické mřížce. Získává se ze dvou hlavních rud, kterými jsou  $\text{MoS}_2$  (molybdenový leštěnec neboli sulfid molybdeničitý) a  $\text{PbMoO}_4$  (wulfenit neboli powelit). Hlavní ložiska těchto rud lze nalézt v Severní Americe, menší zásoby se nachází i na severu Evropy. Z těchto rud se pak v chemických závodech vyrábí téměř čistá kyselina molybdenová  $\text{H}_2\text{MoO}_4$ . Z ní se pak získává kovový molybden. [7]

Tab. č.2.3. Základní vlastnosti molybdenu [7]

Atomové číslo	42
Atomová hmotnost	95,94 g.mol <sup>-1</sup>
Skupenství	pevné
Barva	šedá
Teplota tání	2623 °C (2896 K)
Teplota varu	4639 °C (4912 K)
Hustota $\zeta$	10,28 g.cm <sup>-3</sup>

Ač je molybden za normálního stavu měkký a křehký kov, tak jako legura dodává GJL velice dobré mechanické vlastnosti. Molybden patří do skupiny karbidotvorných prvků. Nejedná se však o prvek perlitotvorný, proto se při legování GJL používá s perlitotvornými prvky (Mn, Ni, Cu, Sn, Sb, Cr, V, W, B). Velice dobrou vlastností molybdenu však je, že dokáže vznikající perlit výrazně zjemňovat, čímž zvyšuje pevnost základní kovové hmoty a stabilizuje strukturu za vyšších teplot [11], což je u brzdového kotouče velice důležité, protože se jedná o velice tepelně namáhanou součást. Výhodou rovněž je, že molybden snižuje citlivost struktury na rychlost ochlazování odlitku, proto umožňuje i odlévání odlitků s nesterpně tlustými stěnami. U feritické struktury se molybden nevyužívá, neboť jeho účinek na zlepšení mechanických vlastností je zde jen nepatrný. [11] Vlastnosti molybdenu jsou tedy velice příznivé, jeho nevýhodou je ovšem příliš vysoká cena. V současné době dosahuje cena FeMo až kolem 1200 Kč/kg [5,6,9]. Tato vysoká cena se promítla i do ceny brzdového kotouče. Cena za 1 kg materiálu je přibližně 18 Kč, přičemž cena 1 kg materiálu bez molybdenu je 11 Kč. Cílem tedy bylo nahradit tento prvek jinými legurami tak, aby si odlitek zachoval předepsané mechanické vlastnosti. Zároveň by měli být voleny takové legury, aby došlo ke snížení ceny odlitku.

### 3. TEORETICKÁ ČÁST

#### 3.1. Základní rozdělení litin

Litiny jsou slitiny železa, uhlíku a dalších prvků, kde obsah uhlíku je vyšší než 2,08 %. Obsah uhlíku tedy převyšuje maximální rozpustnost v austenitu. Další prvky (Si, Mn, P, S a další) ovlivňují jak mechanické i strukturní vlastnosti základní kovové hmoty a tvar vyloučeného grafitu. Litiny mohou krystalizovat podle metastabilního diagramu Fe-Fe<sub>3</sub>C, nebo podle stabilního diagramu Fe-C, kde C je ve formě grafitu. Litiny jsou tvořeny primární fází a eutektikem. U metastabilního

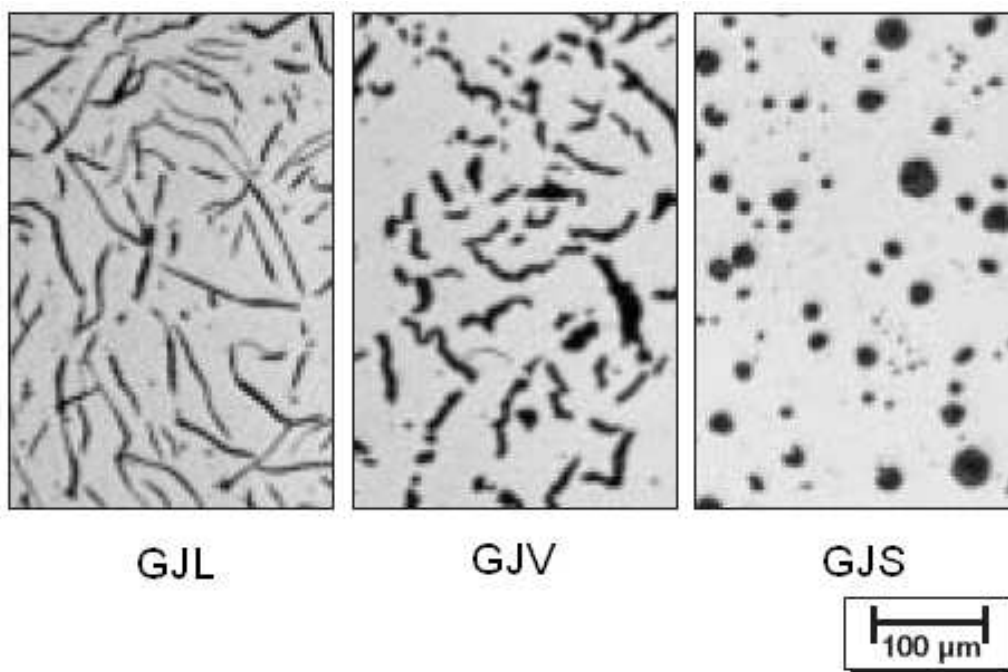
systému je eutektikem ledeburit, tedy směs austenitu a cementitu. Tyto litiny se nazývají litiny bílé, respektive karbidické. U stabilního systému vzniká grafitické eutektikum tvořené austenitem a uhlíkem, který je vyloučen ve formě grafitu. Tyto litiny se nazývají litiny grafitické. Přejíždovým typem mezi litinami grafitickými a bílými tvoří litina maková, která obsahuje jak grafitický, tak metastabilní eutektikum. Tato struktura je však nežádoucí, proto se tyto litiny nepoužívají. Litiny dělíme zejména podle tvaru vyloučeného grafitu. Podle této kategorie rozdělujeme litiny do čtyř skupin, a to litiny s lupínkovým, kuličkovým, červíkovým a vločkovým grafitem. [1,2,4,11]

1, Litina s lupínkovým grafitem (GJL) – Tato litina se dříve nazývala šedá litina. Obsahuje grafit ve formě prostorových útvarů, které se při metalografickém výbrusu jeví jako lupínky. Zakončení lupínků je ostré. Jedná se o světově nejrozšířenější slévárenský materiál [2,4,11].

2, Litina s červíkovým grafitem (GJV) – Dřívějším názvem této litiny je vermikulární litina. Grafit je vyloučen ve formě červíků. Ty jsou oproti lupínkům kratší, tlustější a jejich konec je zaoblený. Litina s červíkovým grafitem často obsahuje i určité množství grafitu kuličkového nebo lupínkového [2,4,11].

3, Litina s kuličkovým grafitem (GJS) – Dřívějším názvem litiny s kuličkovým grafitem je tvárná litina. V tomto případě se grafit při metalografickém výbrusu jeví jako kulička, často se však nejedná o dokonalé kuličky [2,4,11].

4, Litina s vločkovým grafitem (GJM) – Dřívější název této litiny je litina temperovaná. Grafit je v litině vyloučen ve formě vloček. Litinu s vločkovým grafitem můžeme rozdělit na litinu s černým lomem (GJMB) a litinu s bílým lomem (GJMW) [2,4,11].



*Obr.3.1. Tvar grafitu v jednotlivých litinách [8]*

Podle normy ISO 945 dělíme grafit do šesti skupin, jedná se o :

- I. - lupínkový grafit
- II. - pavoučkovitý grafit
- III. - červíkovitý grafit
- IV. - vločkovitý grafit
- V. - nedokonale kuličkovitý grafit
- VI. – dokonale kuličkovitý grafit [11]

Grafit může mít ve struktuře různé rozložení, to opět vyhodnocujeme podle normy ISO 945 a může být:

- A – rovnoměrné rozložení
- B – růžicovité rozložení
- C – smíšené rozložení
- D – mezidendriticky neusměrněné
- E – mezidendriticky usměrněné [11]

Litina s lupínkovým grafitem je v ČR jednoznačně nejpoužívanější litinou. Následuje litina s kuličkovým grafitem a litina s vločkovým grafitem. Roční produkce GJL dosahovala v roce 1989 přes 800 tisíc tun. Od tohoto roku dochází

postupně k výraznému snižování až do roku 1994. Od tohoto roku se roční produkce GJL pohybuje okolo 350 tisíc tun za rok. Stejný vývoj snižování byl i u GJM, která v roce 1989 dosahovala produkce 31 tisíc tun. Poté stejně jako GJL roční produkce klesala až do roku 1994. Od té doby se roční produkce pohybuje kolem 12 tisíc tun za rok. Litina s kuličkovým grafitem dosahovala v roce 1989 produkce 36 tisíc tun. Pak zažila jako všechny litiny pokles na 10,5 tisíce tun v roce 1992. Od téhož roku se situace obrací a dochází ke stálému zvyšování produkce této litiny [2].

### 3.2. Vlastnosti a struktura litin

Litiny mají oproti oceli nižší hustotu ( $7100 - 7300 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Nižší hustota je dána vyšším vyloučením grafitu, než u oceli. Litiny se rovněž vyznačují vyšší tepelnou vodivostí než oceli. Tepelná vodivost litiny  $\lambda$  se pohybuje kolem  $50 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Naproti tomu se s přibývajícím obsahem grafitu snižuje elektrická vodivost. Nepříznivým prvkem působícím na vodivost je křemík, který snižuje jak tepelnou, tak i elektrickou vodivost. Součinitel teplotní roztažnosti  $\alpha$  je u litin menší než u ocelí. Výraznou vlastností litin je dobrá schopnost tlumení vibrací. Tento účinek mají zejména feritické GJL. Tyto litiny absorbují až desetinásobek energie, než kterou absorbují oceli. Tato jejich vlastnost je konstrukčně nesmírně zajímavá a těchto litin je využíváno u stojanů obráběcích strojů, skříní převodovek atd. [2,11]

Struktura litiny je tvořena grafitem a základní kovovou hmotou. Grafit je krystalická forma uhlíku. Grafit krystalizuje v hexagonální soustavě. Má dobrou tepelnou vodivost. Pevnost a tvárnost jsou malé. Hustota grafitu je  $2220 \text{ kg.m}^{-3}$ . Můžeme rozlišovat tři druhy grafitu. První je grafit eutektický (lupínkový, kuličkový, červíkovitý), který vzniká při tuhnutí eutektika. S austenitem nám tvoří grafitické eutektikum. Druhým druhem grafitu je grafit primární. Vzniká jako primární fáze při tuhnutí nadeutektických litin. Má tvar hrubých lupínků. Při dostatečně pomalém tuhnutí odlitku vyplouvá na hladinu kovu a tvoří grafitický šum. Primární grafit je v litině nežádoucí, neboť má nepříznivý vliv na její mechanické vlastnosti. Třetím druhem grafitu je grafit vznikající rozpadem metastabilních složek při tepelném zpracování, zejména při temperování a žhánání na odstranění grafitů [2,11].

Nevýhodou grafitu je poměrně malá pevnost, čímž snižuje pevnost základní kovové hmoty. Na koncích útvarů grafitu dochází ke koncentracím napětí a grafit má tak vrubový účinek. Z tohoto hlediska má největší vrubový účinek lupínek, nejmenší



pak kulička. Proto jsou vlastnosti litiny s kuličkovým grafitem vyšší než u litiny s lupínkovým grafitem. Z hlediska velikosti grafitu platí pro všechny typy litin, že by měl být jemnozrný, vyloučený v formě malých útvarů. Přítomnost větších a hrubých útvarů snižuje mechanické vlastnosti litiny [2,11].

Základní kovová hmota je u nelegovaných litin tvořená feritem, perlitem popřípadě ledeburitem. Legováním nebo tepelným zpracováním můžeme dostat základní kovovou hmotu austenitickou, martenzitickou nebo bainitickou.

### 3.2.1. Strukturní složky litin

Ferit – Je tuhý roztok uhlíku v Fe  $\alpha$ . Mřížka je kubická, prostorově centrovaná. Vzniká při eutektoidní transformaci austenitu podle stabilního systému. Pomalé ochlazování podporuje vznik feritu. Ferit je měkký a tvárný. Má nízkou pevnost, je dobře obrobitelný. V litinách zajišťuje houževnatost. Téměř všechny přísady zvyšují tvrdost a pevnost feritu. Houževnatost je pak některými legurami zvyšovaná (Ni, Cr, Mn) a některými snižovaná (Si) [4,11].

Perlit – Vzniká eutektoidním rozpadem austenitu podle metastabilního systému. Perlit je eutektoid a je to směs feritu a cementitu. Při vzniku vzniká nejprve cementit, vedle pak vznikají lamely feritu. Můžeme dostat dva druhy perlitu, a to lamelární a globulární. U lamelárního perlitu je perlit tvořen lamelami feritu a cementitu, které jsou vedle sebe. Globulární perlit vzniká sbalením lamel při sferoidizačním žíhání, popřípadě při velice pomalém ochlazování litiny. Globulární litina má oproti lamelární lepší obrobitelnost. Pokud bychom srovnávali vlastnosti s feritem, perlit má vyšší pevnost i tvrdost a odolnost proti opotřebení. Platí, že čím jemnější je perlit, tím jsou mechanické vlastnosti lepší. Naopak má nižší tvárnost než ferit. [4,11]

Austenit – Je tuhý roztok uhlíku v Fe  $\gamma$ . Mřížka je kubická, plošně centrovaná. V nelegovaných litinách je austenit stabilní při nadeutektoidních teplotách. Ke stabilizaci austenitu za normální teploty je třeba legovat prvky, které zvyšují stabilitu austenitu (Ni). Austenit se rovněž může dostat do struktury v podobě zbytkového austenitu po tepelném zpracování. Austenit je měkký, tvárný. Odolává korozi a vysokým pevnostem. Důležitou vlastností je, že austenit je paramagnetický [4,11].

Ledeburit – Jedná se o eutektikum v metastabilní soustavě. Je tvořen austenitem a cementitem. Při eutektoidní teplotě austenit transformuje na perlit a vzniká takzvaný transformovaný ledeburit tvořený perlitem a cementitem. Ledeburit je základní složkou bílých litin, u grafitických litin se objevuje v místech s rychlým odvodem tepla jako takzvaná zákalka [4,11].

Martenzit – Vzniká bezdifuzním rozpadem při kalení litin. Martenzit je velice tvrdý (až 1000 HV), zároveň je však také křehký [4,11].

Bainit – Někdy vzniká jako struktura v litinách legovaných molybdenem a niklem, popřípadě při tepelném zpracování. Litiny s bainitickou strukturou mají vysokou pevnost a tvrdost při poměrně dobrých plastických vlastnostech [4,11].

### **3.2.2. Tuhnutí litin a nukleace grafitu**

Tuhnutí litin probíhá ve dvou nezávislých, po sobě jdoucích procesech. Jedná se o krystalizaci primární fáze a krystalizace eutektika. Krystalizace eutektika není pokračováním krystalizace primární fáze. Jedná se o zcela samostatný proces, který může být ovšem krystalizací primární fáze ovlivněn, třeba vymezením prostoru pro vznik eutektika. Oba tyto procesy jsou vždy zahájeny nukleací příslušné fáze a jejím následným růstem. Nukleací se rozumí vznik stabilních zárodků, na nichž může pokračovat růst nové fáze. Nukleaci můžeme rozdělit na nukleaci homogenní a heterogenní. Při homogenní nukleaci je volná entalpie dostatečná k vytvoření vlastních stabilních zárodků. U heterogenní nukleace je pak volná entalpie dostatečná k vytvoření cizích zárodků. Energie potřebná k vytvoření cizích zárodků je menší než energie potřebná k vytvoření zárodků vlastních [2,11].

Na nukleaci grafitu je kladen požadavek, aby byl grafit vyloučen v celém průřezu rovnoměrně a ve stejných útvarech. Grafitizace probíhá mechanismem heterogenní nukleace. Rozhodující roli při nukleaci grafitu mají zárodky na bázi oxidů, sulfidů a karbidů. Termodynamicky nejstabilnější jsou sirníky, nejméně stabilní pak karbidy. Pro grafitizační zárodky musí platit, že při tuhnutí litiny jsou v tuhém stavu a jsou v tavenině nerozpustné, mají mikroskopickou velikost

(normálně kolem 1  $\mu\text{m}$ ) a krystalizační účinek působí na grafit, nikoliv na cementit. V každé litině jsou tvořeny zárodky z běžně přítomných prvků, převahu mají termodynamicky stabilnější zárodky. V litině s lupínkovým grafitem se jedná zejména o  $\text{MnS}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaC}_2$  a  $\text{Al}_4\text{C}_3$ . Obsah síry, která je potřebná pro nukleaci, je pouze několik setin procenta. Naopak při vysokém obsahu síry, působí antigrafitizačně. Zárodky  $\text{SiO}_2$  pak vznikají v litině reakcí kyslíku a křemíku [2,11].

Litiny s lupínkovým, kuličkovým a červíkovitým grafitem tuhnou podle stabilního systému Fe-C. Litina s lupínkovým grafitem je obvykle získávána bez jakýchkoliv zásahů. K získání litiny s kuličkovým a červíkovitým grafitem je litinu třeba modifikovat. Modifikace slouží k tomu, aby se při krystalizaci změnil lupínkovitý grafit na grafit kuličkovitý nebo červíkovitý. Třebaže se vyskytuje mnoho prvků s modifikačním účinkem, v současné době je používán téměř výhradně hořčík, někdy ještě společně s cérem. Hořčík je prvek s globulizačním účinkem. Pro dosažení kuličkovitého grafitu je obsah zbytkového Mg 0,03 - 0,06 %. Pod pojmem zbytkový hořčík lze představit hořčík, který zůstane v litině po proběhnutí všech reakcí při odlévání. Vzniku červíkovitého grafitu se dosáhne při zbytkovém hořčíku 0,01 - 0,02 %. Tento obsah zbytkového hořčíku nezajistí dokonalý vznik kuličkovitého grafitu, čímž vzniká grafit červíkovitý. Někdy se rovněž ke vzniku červíkovitého grafitu používají antiglobulizační prvky. Obvykle se jedná o titan popřípadě hliník. Tyto prvky zablokuje tvar grafitu v červíkovité podobě, a to i při vyšším obsahu hořčíku. K zablokování červíkovitého grafitu stačí obsah Ti 0,15 - 0,35 %. [2,11]

Litina s vločkovým grafitem tuhne podle metastabilního systému. Vločkový grafit ve struktuře vznikne rozpadem cementitu až při takzvaném temperování. Pod pojmem temperování je možné si představit dlouhodobý tepelný proces. Temperování může být buď na bílý lom nebo na černý lom. Litina s bílým lomem se získává temperováním v oxidační atmosféře za teploty kolem 1050 °C. Doba temperování je dlouhá (50-70 hodin). Po této době následuje pomalé ochlazení. Naproti tomu získání litiny s černým lomem probíhá v neutrální atmosféře. Žíhací cyklus je v tomto případě složitější a probíhá ve více stupních. Nejprve dochází k I. stupni grafitizace při teplotách 950 °C. V této fázi dochází k rozpadu ledeburitického cementitu na austenit a vločkový grafit. Doba žíhání je u I. stupně kolem 10 hodin. II. stupeň grafitizace je rozhodující z hlediska získané struktury. II. stupeň grafitizace probíhá při teplotách 710-750 °C. Pokud proběhne II. stupeň

grafitizace dokonale, výsledná struktura je feritická. Pokud proběhne nedokonale (zkráceně), je výsledná struktura feriticko – perlitická. Rychlost ochlazování se volí 2-5 °C/ hodinu. Při takovéto rychlosti ochlazování vzniká struktura čistě feritická. Pokud se rychlost ochlazování zvyšuje, roste podíl perlitu v základní struktuře. [2,11]

### 3.2.3. Očkování litin

Důležitým procesem při odlévání je očkování litin. Očkováním rozumíme vnášení látek do roztavené litiny, které vedou ke vzniku zárodků pro krystalizaci grafitu. Zvýšením počtu zárodků dostaneme zlepšení podmínek pro nukleaci a růst grafitu. Očkování rovněž potlačuje sklon k tuhnutí litiny podle metastabilního systému. Dále zajišťuje rovnoměrné rozložení grafitu. Při nedostatečném očkování vzniká nerovnoměrně rozložená struktura. Díky zjemnění struktury nám zvyšuje mechanické vlastnosti. Oblast litiny, která pak přísluší jednomu útvaru grafitu, se nazývá eutektická buňka. Čím vyšší je tedy počet krystalizačních zárodků, tím vyšší je počet eutektických buněk a tím jemnější je výsledná struktura. Očkovadlo je tvořeno dvěma složkami. Nosičem a krystalizačně aktivní složkou. Nejčastěji používaným očkovadlem je slitina Fe – Si neboli ferosilicium. Po naočkování ferosiliciem dojde v místech, kde je vyšší koncentrace křemíku, k aktivitě uhlíku a tím podpoře nukleace jader. Samotné ferosilicium nemá očkovací účinek, v malé míře proto obsahuje Ca, Sr, Al nebo Zr. Někdy se jako očkovadlo používá též uhlíkové očkovadlo. Aktivní složkou je v tomto případě krystalický uhlík. Kromě toho také obsahují i část Fe – Si. K očkování je možné použít tři metody. Buď přidat očkovadlo přímo v pánvi, nebo do proudu taveniny při lití, či do slévárenské formy. Účinnost očkovadel je klesající s rostoucími teplotami a časem. Obsah očkovadla je závislý na mnoha faktorech, kterými jsou například tloušťka stěn, druhu očkovadla apod. Obecně však platí, že obsah očkovadla se volí 0,2 – 1 %. Očkovadlo by nemělo před použitím přijít do kontaktu se vzduchem, důležité je proto skladování v uzavřených nádobách [2,11].

### 3.2.4. Výroba litin

K tavení litin se využívá čtyřech základních druhů pecí. Jedná se o kuplovny, elektrické indukční pece (EIP), elektrické obloukové pece (EOP) a bubnové pece.

Nejčastěji používané jsou zejména kuplovný a EIP. Pro GJL jsou obvykle využívány kuplovný, ale jejich nevýhodou je obtížné dodržení chemického složení a zvýšený obsah síry, která je obsažena v koksu. Z těchto důvodů jsou často nahrazovány EIP, které tyto problémy odstraňují, ovšem za cenu vyšších pořizovacích nákladů [2,12].

Vsázková surovina pro tavení litin je tvořena kovovou vsázkou, palivem, struskotvornou přísadou, legurami a očkovačem.

Kovová vsázka může být tvořena surovým železem, vratným materiálem, litinovým odpadem, ocelovým odpadem nebo třískami. Surová železa představují kvalitní, ale drahou část kovové vsázky. Jsou dodávána ve tvaru housek, s nízkým obsahem síry a fosforu. U slévárenských surových želez je obsah uhlíku obvykle v rozmezí 3,7 – 4,3 %, obsah křemíku vyšší než 1,2 % a obsah manganu 0,4 – 1,3 %. Vratný materiál je materiál z již odlitých dílů. Jedná se například o vtoky, nálitky a zmetky. Tento materiál je před přidáním do kovové vsázky obvykle otryskán a nadělen. Litinový a ocelový odpad pochází ze sběru kovového odpadu. Nevýhodou takového materiálu je zejména neznámé chemické složení. Třísky jsou využívány do kovové vsázky jen výjimečně. Pokud se používají, musí být odmaštěné a nesmí být rezavé a tvoří maximálně 5 % kovové vsázky. [2,11]

Kromě kovové vsázky se přidávají legury. Ty slouží k upravení chemického složení litin. Obvykle se upravuje pouze vliv Si a Mn. Prvky můžeme rozdělit podle afinity ke kyslíku. Dělíme je na prvky s větší afinitou než má železo a s menší afinitou než má železo. Prvky s větší afinitou než má železo jsou zejména Si, Mn, Cr, Al, P a také V, Mo a W. U těchto prvků dochází k propalu. Tyto prvky se do litin přidávají pomocí feroslitin. Čím nižší je obsah prvku ve feroslitině, tím menší dostáváme propal. Prvky, které mají menší afinitu ke kyslíku než železo, nemají propal, a proto jsou do litin přidávány ve formě čistých kovů. Jedná se například o Cu a Ni či Sn. Legury je nutné přidávat do litiny ve správných kusech, nepřípustné je přidávat kovy v práškové podobě [2,11].

Jako paliva se při tavení litin v kuplovných využívá zejména slévárenského koksu, popřípadě plynu či jiného topného média. Slévárenský koks je složen z 90 % C, 8 % popela, 1 % S a 1 % prchavých látek. Slévárenský koks je poměrně drahou záležitostí, proto je snaha o jeho alespoň částečnou náhradu. K tomuto účelu se využívá zejména antracit nebo koksové brikety [2,11].

Poslední součástí vsázky jsou struskotvorné přísady. Ty vedou k vytvoření strusky. Ta má za účel chránit roztavený kov před oxidací a vázat nečistoty, kterými

jsou zejména popel, oxidy z propalu, otěr a otavení vyzdívky. Také má za úkol rafinaci kovu neboli vázání síry. Jako struskotvorných látek je využíváno látek jako dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), kazivec ( $\text{CaF}_2$ ), soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) nebo karbid vápníku či drcené sklo a křemenný písek [2,11].

### 3.3. Teorie litiny s lupínkovým grafitem

Jak již bylo napsáno, litina s lupínkovým grafitem (GJL), dříve nazývaná šedá litina, je litina, která obsahuje grafit ve formě lupínků. Kromě uhlíku litina obsahuje další prvky, a to ať již se jedná o legury nebo nečistoty. Jedná se o nejčastěji používaný slévárenský materiál. Nejčastěji se používá GJL s perlitickou matricí. S rostoucím podílem feritu se mechanické vlastnosti GJL snižují. Pro GJL platí, že má téměř nulovou tažnost, tvařitelnost a vrubovou houževnatost. Platí, že mez pevnosti v tlaku je přibližně trojnásobkem meze pevnosti v tahu. Velice příznivou vlastností je dobré tlumení vibrací, které může být až desetinásobné než u oceli. Touto vlastností se vyznačuje zejména GJL s vyšším obsahem feritu ve struktuře. Výhodou je dobrá slévateľnost a obrobiteľnost GJL. Důležité jsou mezní obsahy prvků. Pod hranicí mezního obsahu považujeme litiny za nelegované, pokud prvek překročí mezní obsah, litina se považuje za legovanou [2,11].

*Tab. 3.3. Mezní obsahy prvků u litiny s lupínkovým grafitem [2]*

Prvek	Obsah v %
křemík	3,00
mangan	1,00
fosfor	0,50
síra	0,15
chrom	0,20
nikl	0,20
ostatní prvky	0,05

Prvky, které se vyskytují v litině, můžeme rozdělit podle vlivu na grafitizaci při tuhnutí eutektika. Dělíme je na :

1, Grafitizační – To jsou prvky, které podporují tuhnutí podle stabilního systému a vyloučení uhlíku v podobě grafitického eutektika. Silně grafitizační jsou prvky Si, Al. Mezi slaběji grafitizační prvky patří Ni, Cu, C, P a Ti [2,11].

2, Antigrafitizační – Jsou to prvky, které nám omezují vznik volného grafitu a to tak, že na sebe vážou uhlík ve formě karbidů nebo podporují vznik metastabilního eutektika – ledeburitu. Mezi silně antigrafitizační prvky patří Cr, V, Mg, Te, Ce, B a S. Slabě antigrafitizačním prvkem je pak Mo [2,11].

3, Neutrální – Jsou to prvky, které nám nepůsobí ani grafitizačně ani antigrafitizačně. Jedná se o Mn, Co, Zn a W [2,11].

Dalším možným dělením prvků je dělení podle vlivu na druh základní kovové hmoty. Prvky můžeme rozdělit do 3 skupin. A to na prvky feritotvorné, kterými jsou Si, Al a Ti. Dále na prvky perlitotvorné Mn, Cu, Ni, Sn, Sb, Cr, V, W a Mo. Austenitotvorně pak působí Ni, ale až při obsahu nad 18 % [2,11].

### **3.3.1. Vliv jednotlivých legur na vlastnosti litiny s lupínkovým grafitem**

V této kapitole je popsán vliv jednotlivých prvků vyskytujících se v litinách. Tyto informace jsou důležité při řešení nahrazení složení s molybdenem.

Uhlík – Jedná se o prvek s největším vlivem na strukturu a vlastnosti litiny. Vliv uhlíku na mechanické vlastnosti je malý. Uhlík nepatrně snižuje pevnost i tvrdost. Jedná se o prvek grafitizační. Vyšší obsah uhlíku vede ke zlepšení útlumových vlastností. Litina nám při vylučování grafitu zvyšuje svůj objem, tím kompenzuje smrštění, ke kterému dochází při krystalizaci austenitu. Tímto odpadá nutnost nálitkování litiny [2,11].

Křemík – V litině se jedná o druhý nejdůležitější prvek. Výrazně podporuje grafitizaci a významně ovlivňuje mechanické vlastnosti litin. Křemík zvyšuje jejich tvrdost, ale snižuje tažnost a vrubovou houževnatost. Křemík je feritotvorný prvek, a proto dochází ke zvýšení podílu feritu a tím ke snížení pevnosti i tvrdosti. Velkou nevýhodou křemíku je podpora vzniku křehkých lomů [2,11].

Mangan – Řadí se mezi neutrální prvky, proto nemá téměř žádný vliv na grafitizaci. Až při obsahu nad 0,5 % působí mírně antigrafitizačně. Mangan v litině stabilizuje perlit a zároveň ho výrazně zjemňuje. Rovněž zvyšuje pevnost, tvrdost a odolnost litiny proti otěru. Velice důležitou pozitivní vlastností manganu je, že na sebe váže síru dle chemické rovnice (3.3.1.1)



Je to vlastnost důležitá, protože síra je v litinách nežádoucím prvkem. Minimální obsah manganu se volí dle vztahu (3.3.1.2) :

$$\text{Mn} = 1,7 \cdot \text{S} + 0,3 [\%] \quad (3.3.1.2)$$

Fosfor – Prvek mírně podporující grafitizaci. Do obsahu 0,5 % zvyšuje pevnost, tvrdost a ořezavost. Při nižším obsahu se pevnost litiny snižuje. Během tuhnutí litiny dochází k segregaci fosforu do zbylé taveniny, na hranicích zrn vzniká fosfidické síťoví. Tento jev způsobuje křehkost litiny. Ke vzniku fosfidického eutektika dochází již při obsahu nad 0,02 % fosforu. Proto se v litině volí co nejmenší obsah fosforu. Vznik fosfidického eutektika je ještě navíc podporován prvky Mo, Cr, W a V. Fosfidické eutektikum je tvrdé, snižuje houževnatost a obrobitelnost litiny. Fosfor je využíván pouze u tenkostěnných odlitků z důvodu lepší zabíhavosti. Pak se používá obsah fosforu i nad 1 % [2,11].

Síra – Je v litině nežádoucí. Jedná se o antigrafitizační prvek, který má sklon k segregaci a způsobuje křehkost litiny. Účinek síry se vyruší příslušným obsahem manganu v litině [2,11].

Měď – Prvek mírně podporující grafitizaci. Je používán ke stabilizaci perlitu v obsahu 0,5 – 1,5 %. Ale rovněž slouží ke zvýšení mechanických vlastností. Často se kombinuje s chromem v poměru Cu:Cr (2 - 4:1). Tím se dosahuje jemné perlitické struktury s jemným grafitem a vysokými mechanickými vlastnostmi. Pro legování je nutné používat čistou měď, přísady totiž způsobují degeneraci grafitu. [2,11]



Nikl – Mírně podporující grafitizaci. Je používán ke stabilizaci perlitu a zvyšuje mechanické vlastnosti. Pro zvýšení mechanických vlastností a dosažení jemné struktury se využívá v kombinaci s mědí. Od 17 % nikl působí austenitotvorně [2,11].

Chrom – Karbidotvorný prvek. Napomáhá nejen zjemnění grafitu, ale zároveň působí perlitotvorně a perlit zjemňuje. Zvyšuje pevnost a tvrdost litiny. Při vzniku karbidů se výrazně snižuje obrobitelnost. Vznik karbidů se kompenzuje pomocí mědi. Často se chrom používá pro zvýšení mechanických vlastností. Leguje se obvykle v množství 0,3 – 0,5 %. Ve feritických litinách má být obsah chrómu co nejmenší [2,11].

Vanad – Silně karbidotvorný prvek. Zároveň je to prvek perlitotvorný a perlit zjemňuje. Také zvyšuje tvrdost a pevnost litiny. Použití tohoto prvku je u litin méně časté. Používá se obvykle jen tam, kde chceme dosáhnout vysoké ořezavzdornosti. Použití v rozmezí 0,2 – 0,3 % [2,11].

Molybden – Velice významná legura. Nevýhodou molybdenu je však přílišná cena. Molybden sice není perlitotvorným prvkem, vznikající perlit však výrazně zjemňuje. Používá se proto v kombinaci s perlitotvornými prvky. Rovněž zvyšuje pevnost perlitické struktury a stabilizuje strukturu za vyšších teplot. U feritických litin se molybdenu nevyužívá, protože je zde jeho účinek zanedbatelný. Společně s niklem se však používá ke vzniku bainitické litiny. Leguje se maximálně do 0,8–1 %. Nevýhodou je, že v kombinaci s fosforem nám zvyšuje sklon ke vzniku fosfidového eutektika, proto je třeba udržovat obsah fosforu co nejnižší [2,11].

Hliník – Podporuje grafitizaci až do obsahu 4,5 %. Při vyšším obsahu působí antigrafitizačně. Obvykle se u GJL používá v řádech desetin či setin. [2,11].

Titan – Podporující grafitizaci až do obsahu 0,5 %. Při vyšším obsahu působí antigrafitizačně a výrazně zhoršuje třecí vlastnosti a obrobitelnost. Proto se titan používá do obsahu 0,1 % [2,11].

Cín – Působí silně perlitotvorně. Pro dosažení plné perlitické struktury stačí již obsah cínu 0,1 – 0,15 %. Cín také výslednou perlitickou strukturu zjemňuje. Tím dochází ke zvýšení tvrdosti a pevnosti litiny [2,11].

Antimon – Prvek podobně působící jako cín, ale silněji. K vytvoření zcela perlitické struktury stačí obsah antimonu 0,03 – 0,06 %. Litina by neměla mít vyšší obsah antimonu, protože pak dochází k výraznému snížení její pevnosti. [2,11]

Bór – Je silným karbidotvorným a nitridotvorným prvkem. Výrazně zvyšuje tvrdost a otěruvzdornost. Používá se k mikrolegování, například u brzdových kotoučů [2,11].

Telur – Prvek stabilizující karbidy. Používá se jako součást nátěrů forem a jader tam, kde je nutné dosáhnout perlitické struktury nebo zabránit vzniku hrubého grafitu. Obvyklé použití u odlitků s rozdílnou tloušťkou stěn [2,11].

Olovo a vizmut – Jedná se o nejškodlivější prvky v grafitických litinách. Již při obsahu v řádech setin procenta způsobují degradaci grafitu. Zároveň až několikanásobně snižují mechanické vlastnosti [2,11].

Dusík – Při obsahu nižším než 0,02 % působí perlitotvorně, zjemňuje grafit a tím zvyšuje mechanické vlastnosti. Při vyšším obsahu však může způsobovat bodlinatost odlitků. Dusík se do litiny dostává z ocelové složky vsázky a také z legur [2,11].

Kyslík – Bývá v litinách rozpuštěn do obsahu 0,01 %. Je prvkem nezbytným pro tvorbu oxidických zárodků. Jeho obsah i sklon litiny ke grafitizaci jsou závislé i na způsobu tavení. Proto mají litiny z kuploven lepší grafitizační schopnost než litiny z indukčních pecí [2,11].

Vodík – Vliv vodíku na výslednou strukturu litiny se nepokládá za významný. Nepatrně podporuje vznik hrubého grafitu a hrubého perlitu. Při vyšším obsahu podporuje pórovitost litiny [2,11].

Jednotlivé legující prvky ovlivňují aktivitu uhlíku v roztoku železa a tím způsobují změnu hodnoty eutektické koncentrace uhlíku. Účinek prvků je pak ekvivalentní obsahu uhlíku. Souhrnný vliv uhlíku a ostatních prvků je vyjadřován pomocí uhlíkového ekvivalentu. Ten se označuje  $C_E$  a spočte se dle vztahu (3.3.1.3)

$$C_E = C + \sum m_i \cdot X_i \quad (3.3.1.3)$$

Kde  $C$  je procentuální obsah uhlíku v litině,  $X_i$  je procentuální obsah prvku  $X$  a  $m_i$  je koeficient vlivu prvku  $X_i$ .

*Tab. 3.3.1. Vliv základních prvků na velikost koeficientu  $m_i$  [2]*

Prvek	P	Si	Al	Cu	Ni
$m_i$	0,33	0,32	0,22	0,07	0,05
Prvek	Mn	Cr	V	Ti	
$m_i$	-0,03	-0,06	-0,14	-0,14	

S přihlédnutím k obvyklému množství prvků a velikostí koeficientů  $m_i$  se pro výpočet uhlíkového ekvivalentu uvažuje pouze Si a P. Poté se pro výpočet uhlíkového ekvivalentu využívá zjednodušeného vztahu (3.3.1.4).

$$C_E = C + 0,3 (Si + P) \quad (3.3.1.4)$$

Podle hodnoty uhlíkového ekvivalentu  $C_E$  pak lze dělit litiny na podeutektické ( $C_E < 4,25$ ), eutektické ( $C_E = 4,25$ ) a nadeutektické ( $C_E > 4,25$ ). U metastabilního systému je poloha eutektického bodu  $C_E = 4,3$ . Dalším důležitým pojmem je stupeň eutektičnosti  $S_E$ . Je definován jako poměr skutečného obsahu uhlíku k obsahu uhlíku, který odpovídá eutektické koncentraci při daném obsahu křemíku a fosforu. Pokud je  $S_E$  rovno 1, litina má eutektické složení. Výpočet stupně eutektičnosti je uveden ve vztahu (3.3.1.5) [1,2,11]

$$S_E = C / 4,25 - 0,3 (Si + P) \quad (3.3.1.5) \quad [2]$$

Posledním důležitým koeficientem je grafitizační koeficient  $K_G$ . Jedná se o koeficient, který nám vyjadřuje schopnost grafitizace. Čím větší je  $K_G$  tím lepší je schopnost grafitizace. Vztah pro výpočet grafitizačního koeficientu je určen vztahem (3.3.1.6).

$$K_G = \frac{4}{3} Si \left( 1 - \frac{5}{3C + Si} \right) \quad (3.3.1.6) \quad [2]$$

### 3.4. Možnosti náhrady molybdenu v nízkolegované GJL

Cílem legování litin je dosažení takových vlastností, které bychom u nelegovaných litin získávali jen velice složitě, popřípadě vůbec ne. Přes veliký význam těchto litin nejsou nízkolegované litiny normovány. Účelem legování je především zajištění perlitické struktury v celém průřezu, zvýšení mechanických vlastností, stabilizace mechanických vlastností za vyšších teplot a zvýšení odolnosti proti korozi. Při legování litin je nutné brát v úvahu i to, že některé legury kromě příznivých účinků mohou působit na výslednou strukturu nepříznivě. Při výběru legur je třeba dbát i na ekonomické hledisko, tedy používat pokud možno nejlevnější legury, a jejich obsah nevolit vyšší, než je nezbytně nutné. Nejčastěji používanými legurami u nízkolegovaných GJL jsou Cr, V, Mo a Sn. Méně častěji používanými legurami pak jsou Al, Ti a Sb.

U jednotlivých způsobů náhrady včetně původního složení byla vypočtena cena legujících prvků tak, aby mohl být posouzen ekonomický dopad jednotlivých náhrad molybdenu. Ceny jednotlivých legur se rychle mění a jsou závislé na mnoha faktorech. Ceny uvedené v tab.3.4. jsou ceny kovů z března 2006 přepočtené podle aktuálního kurzu USD, který byl brán 24 Kč/USD [5].

Tab. 3.4. Ceny jednotlivých legur [5,6,9]

Prvek	Cena za kg [Kč]
FeCr 70%	210
Cu	115
Ti	460
FeMo 60%	1200
Ni	350
Sn	185
Sb	100
FeV 75 %	1130
Al	57
FeSi 75 %	15
FeMn 78 %	18

### 3.4.1. Rozbor původního složení brzdového kotouče

Původní složení odlitku brzdového kotouče je uvedené v tabulce 3.4.1.1.

Ekonomická analýza původního složení je uvedena v tab.3.4.1.2.

Tab.3.4.1.1. Chemické složení původního brzdového kotouče [3]

<b>Legura</b>	C	Si	Mn	S	P
<b>Obsah</b>	3,7-3,8	1,6-1,75	0,5-0,8	0,12	0,03
<b>Legura</b>	Cr	Cu	Ti	Mo	
<b>Obsah</b>	0,15-0,2	0,5-0,7	0,02	0,2-0,35	

Tab.3.4.1.2. Cena legur původního složení vztažena na 1 kg

Legura	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Mo
Cena (Kč)	0,35	0,18	0,6	0,8	0,1	7
Celková cena (Kč)	9,03					

Uhlíkový ekvivalent:  $C_E = C + 0,3 (Si + P) = 3,75 + 0,3 \cdot (1,675 + 0,03) = 4,26$ . Jedná se tedy o litinu s přibližně eutektickým složením.

Ve struktuře je 0,12 % síry. Ta je ve struktuře nežádoucím prvkem, který způsobuje křehkost litiny a zhoršení mechanických vlastností. Ač je to nežádoucí prvek, tak ve struktuře musí být, protože je nezbytná z hlediska nukleace. Síra je ve struktuře vyrušována manganem. Obsah manganu by měl být zvolen dle vzorce (3.3.1.2). Tedy  $Mn = 1,7 \cdot S + 0,3 = 1,7 \cdot 0,12 + 0,3 = 0,51 \%$ . Což u tohoto složení vyhovuje. Mangan rovněž slouží ke stabilizaci a zjemnění perlitické struktury a ke zvýšení mechanických vlastností, ale na grafitizaci mangan nemá téměř vliv. Fosfor je dalším nežádoucím prvkem, který tvoří nepříjemné fosfidické sít'oví. Obsah fosforu je nutné v litinách dodržovat pouze do 0,08 %. Chrómu a mědi je využíváno obvykle v poměru 1 : (2-4). Jejich vzájemná kombinace vede ke zvýšení mechanických vlastností, stabilizaci a zjemnění perlitu. Důležitou vlastností těchto dvou prvků je, že zajišťují zachování mechanických vlastností za vyšších teplot. Měď zároveň vyrušuje karbidotvornost chrómu a působí grafitizačně. Titan, který je přidán v malém množství, zajišťuje zvýšení odolnosti proti otěru. Molybden, který je třeba nahradit, zvyšuje mechanické vlastnosti a zachování mechanických vlastností za

vyšších teplot. Nejedná se o perlitotvorný prvek, perlit však výrazně zjemňuje. Vytvoření perlitické struktury zde zajišťuje Cr a Cu.

### 3.4.2. Nahrazení cínem a antimonem

Jedná se o dvojí, velice podobný způsob náhrady, kde v jednom případě je využito antimonu, ve druhém případě cínu. Způsoby náhrady jsou uvedeny v tab. 3.4.2.1 a tab.3.4.2.2. Ekonomické analýzy při náhradě cínem a antimonem jsou uvedeny v tab.3.4.2.3. a tab.3.4.2.4.

*Tab.3.4.2.1. Chemické složení při nahrazení cínem Sn*

<b>Legura</b>	C	Si	Mn	S	P
<b>Obsah</b>	3,7-3,8	1,6-1,75	0,8	0,04	0,03
<b>Legura</b>	Cr	Cu	Ti	Ni	Sn
<b>Obsah</b>	0,2	0,4	0,02	0,2	0,15

*Tab.3.4.2.2. Chemické složení při nahrazení antimonem Sb*

<b>Legura</b>	C	Si	Mn	S	P
<b>Obsah</b>	3,7-3,8	1,6-1,75	0,8	0,04	0,03
<b>Legura</b>	Cr	Cu	Ti	Ni	Sb
<b>Obsah</b>	0,2	0,4	0,02	0,2	0,06

*Tab.3.4.2.3. Cena legur při náhradě cínem vztažena na 1 kg*

Legura	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Sn	Ni
Cena (Kč)	0,35	0,18	0,6	0,46	0,1	0,28	0,7
Celková cena (Kč)	2,67						

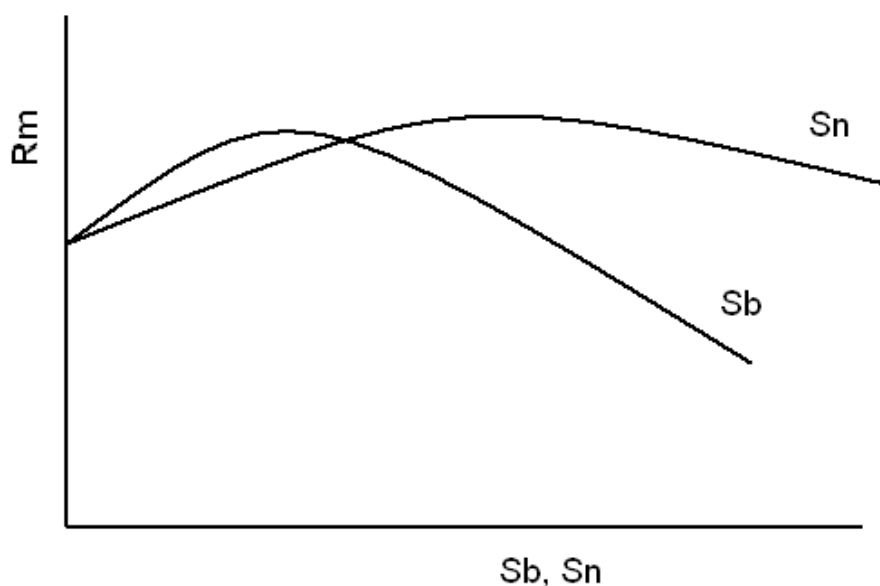
*Tab.3.4.2.4. Cena legur při náhradě antimonem vztažena na 1 kg*

Legura	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Sb	Ni
Cena (Kč)	0,35	0,18	0,6	0,46	0,1	0,06	0,7
Celková cena (Kč)	2,45						

Obsah uhlíku a křemíku zde zůstává stejný, stejně jako je tomu u fosforu. Beze změny je zde i mangan. Obsah síry je změněn na 0,04 %, tedy mez, která je bezpodmínečně nutná k nukleaci. Nepatrný obsah titanu opět slouží k získání dobré odolnosti proti otěru. Ve složení kotouče přibývá 0,2 % niklu. Nikl působí grafitizačně, stabilizuje perlit a zvyšuje mechanické vlastnosti. Hlavním důvodem

přidání niklu je zajištění stálosti za vyšších teplot. Ta je zajištěna kombinací prvků Cr, Cu a Ni. U původního odlitku byla zajištěna prvky Mo, Cu a Cr. Nikl tedy zajišťuje stálost mechanických vlastností za vyšších teplot, sám však mechanické vlastnosti zvyšuje jen nepatrně.

Mechanické vlastnosti jsou v tomto případě zajištěny antimonem, popřípadě cínem. Obsah cínu je volen 0,15 % a obsah antimonu 0,06 %. Jak je patrné z obr.3.4.2. tyto obsahy by neměly být překročeny, protože při vyšším obsahu dochází k poklesu  $R_m$ , a to zejména u antimonu. Při legování těmito legurami by mělo být dosaženo tvrdosti 200-220 HB [11] a meze pevnosti v tahu 200 Mpa [11], tedy hodnot, které odpovídají požadavkům. Cín působí silně perlitotvorně a také vznikající perlit výrazně zjemňuje. Stejný účinek, ale ještě silnější má i antimon. Protože jak antimon, tak cín jsou silně perlitotvorné prvky, byl snížen obsah mědi na 0,4 %. Takováto kombinace mědi a cínu (popřípadě antimonu) zajistí strukturu 99 % perlitu [10].



Obr.3.4.2. Závislost  $R_m$  na obsahu Sb popřípadě Sn [11]

### 3.4.3. Nahrazení vanadem

Jedná se o způsob náhrady molybdenu vanadem, tedy prvkem, který má podobné vlastnosti jako má molybden. Chemické složení při tomto návrhu náhrady je uvedeno v tab.3.4.3.1. Ekonomická analýza této náhrady je v tab.3.4.3.2.

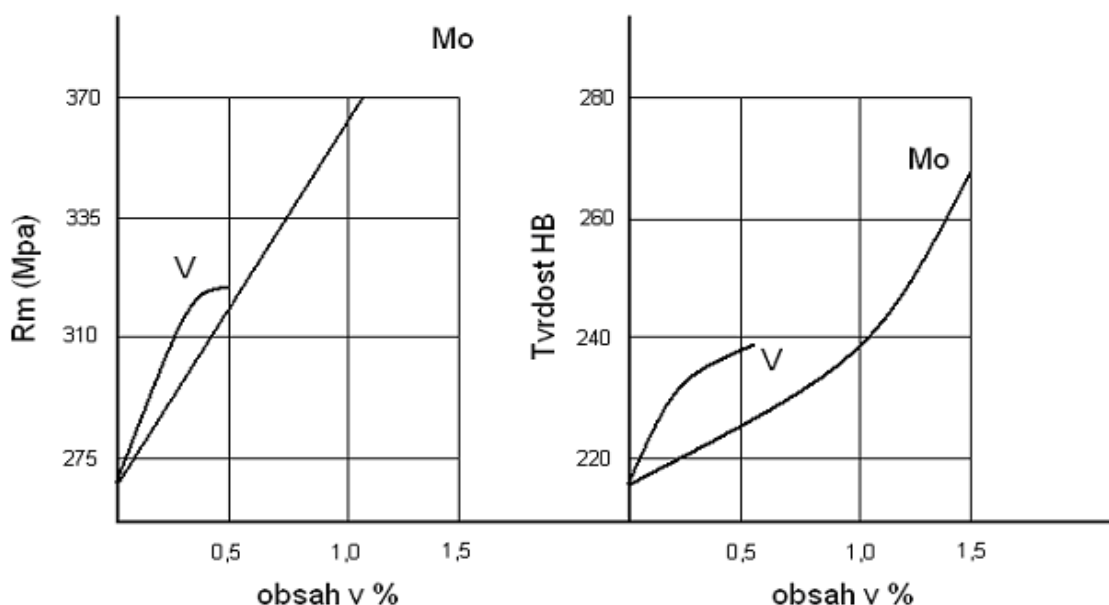
Tab.3.4.3.1.Chemické složení při nahrazení vanadem

Legura	C	Si	Mn	S
Obsah	3,7-3,8	1,6-1,75	0,8	0,04
Legura	Cr	Cu	V	P
Obsah	0,2	1	0,25	0,03

Tab.3.4.3.2. Cena legur při náhradě vanadem vztažena na 1 kg

Legura	Si	Mn	Cr	Cu	V
Cena (Kč)	0,35	0,18	0,6	1,15	3,77
Celková cena (Kč)	6,05				

Obsah křemíku a uhlíku je stejný jako u původního složení, stejně tak je tomu i u fosforu. Obsah síry je snížen na 0,04 %, tedy mez, která je bezpodmínečně nutná k nukleaci. Nezměněn zůstává i obsah manganu. Molybden je zde nahrazen vanadem. Jedná se o prvek perlitotvorný. Příznivé je, že perlit účinkem vanadu je výrazně zjemňován. Avšak jeho nevýhodou je, že podporuje tuhnutí podle metastabilního systému a vznik zákalky. Z tohoto důvodu musí být ve struktuře větší podíl grafitotvorných prvků. V tomto případě došlo ke zvýšení obsahu mědi na 1,0%.



Obr.3.4.3.Vliv molybdenu a vanadu na tvrdost a Rm litiny [11]



Jak je vidět na obr 3.4.3 vanad do obsahu 0,5 % zvyšuje mez pevnosti v tahu i tvrdost litiny více než molybden. Vanad je však používán pouze do obsahu 0,3 % kvůli sklonu k tuhnutí podle metastabilního systému. V tomto případě byl použit obsah 0,25 %, který zajistí požadované mechanické vlastnosti. Výhodou vanadu je také dobrá odolnost proti otěru. Díky tomu byl ze složení vypuštěn titan, který tuto vlastnost zajišťoval. Vanad také napomáhá stabilizaci mechanických vlastností za vyšších teplot. Z tohoto důvodu je zde oproti předešlé náhradě cínem (popřípadě antimonem) vypuštěn nikl. K zajištění mechanických vlastností za vyšších teplot je zde využito kombinace prvků Cr, Cu a V.

### 3.4.4. Nahrazení zvýšeným obsahem chrómu

Při tomto způsobu náhrady byl molybden ze složení litiny zcela odstraněn, k jeho nahrazení dochází zvýšeným obsahem chrómu. Chemické složení tohoto způsobu náhrady je uvedeno v tab. 3.4.4.1. Ekonomická analýza při tomto způsobu náhrady je v tab.3.4.4.2.

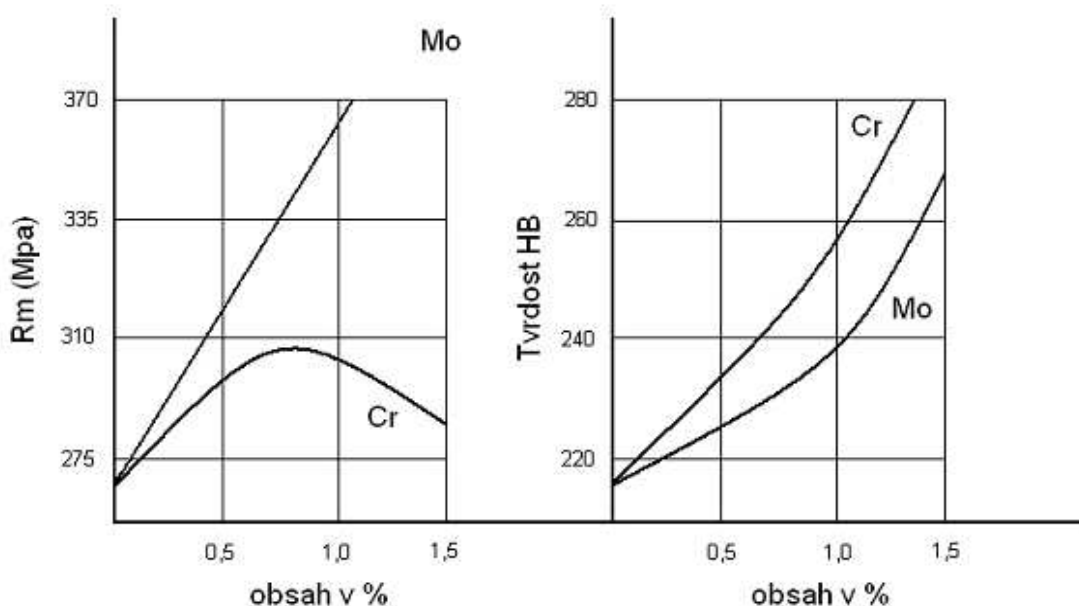
*Tab 3.4.4.1. Chemické složení při nahrazení zvýšeným obsahem chrómu a niklu*

Legura	C	Si	Mn	S	P
Obsah	3,7-3,8	1,6-1,75	0,8	0,04	0,03
Legura	Cr	Cu	Ti	Ni	
Obsah	0,5	1,5	0,02	0,2	

*Tab.3.4.4.2. Cena legur při náhradě chrómem a niklem vztažena na 1 kg*

Legura	Si	Mn	Cr	Cu	Ti	Ni
Cena (Kč)	0,35	0,18	1,5	1,73	0,1	0,7
Celková cena (Kč)	4,56					

Obsah křemíku a uhlíku je stejný jako u původního složení, stejně tak je tomu i u fosforu. Obsah síry je změněn na 0,04 %, tedy mez, která je bezpodmínečně nutná k nukleaci. Nezměněn zůstává i obsah manganu. Odolnost proti otěru zde zůstává zajištěna pomocí titanu. Chrom je prvek perlitotvorný a zároveň vznikající perlit výrazně zjemňuje. Jeho nevýhodou je podobně jako u vanadu sklon k metastabilnímu tuhnutí a vzniku zákalky, používá se tedy pouze do obsahu 0,5 %. Proto je v litině zvýšen obsah mědi, která je grafitotvorná na 1,5 %.



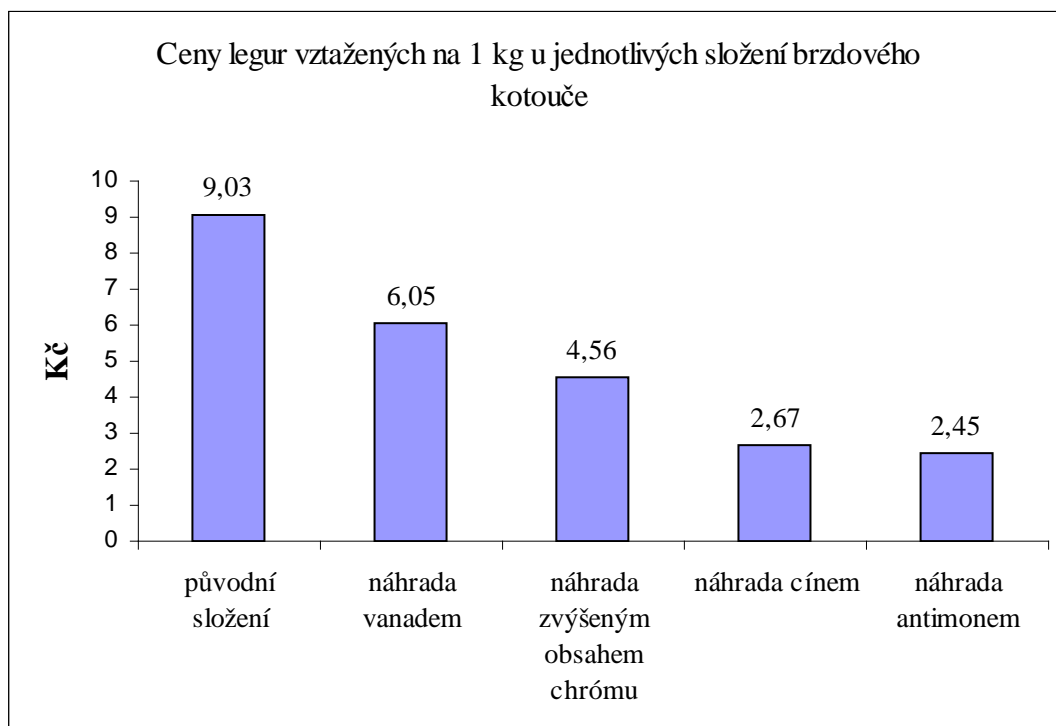
Obr 3.4.4. Vliv molybdenu a chrómu na tvrdost a  $R_m$  [11]

Jak je vidět na obr. 3.4.4. s rostoucím obsahem chrómu se tvrdost zvyšuje výrazněji než u molybdenu, avšak pevnost v tahu tak výrazně neroste. Proto byl zvolen obsah chrómu 0,5 %, který odpovídá zhruba 0,35 % molybdenu. K zajištění mechanických vlastností za vyšších teplot je zde opět využita kombinace Cr, Ni a Cu.

### 3.5. Ekonomický rozbor náhrad

Ceny legur vztažených na 1 kg jsou uvedeny u jednotlivých způsobů náhrady. Na obr 3.5. je vidět porovnání nákladů na legury vztažené na 1 kg u jednotlivých způsobů náhrady molybdenu včetně původního složení brzdového kotouče.

Nejvýraznější úspory je dosaženo při nahrazení molybdenu antimonem a cínem. Pokud vezmeme v potaz váhu odlitku, která je 9 kg, tak úspora na jednom brzdovém kotouči při náhradě antimonem dosahuje 59,2 Kč a u náhrady cínem 57,2 Kč. U dalších dvou náhrad už není úspora tak výrazná. To je dáno vyššími cenami chrómu (210 Kč/kg) a vanadu (1130 Kč/kg). U náhrady zvýšeným obsahem chrómu je úspora 40,2 Kč a při náhradě vanadem 26,8 Kč.



Obr 3.5. Ceny legur vztažených na 1 kg u jednotlivých složení brzdového kotouče

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 4.1. Úvod do experimentální části

V této části bylo cílem prověření mechanických vlastností brzdových kotoučů s legurou Mo. Byly ověřeny předepsané hodnoty, které jsou uvedené v části 2.2. Byla provedena zkouška klínová, zkouška tvrdosti dle Brinella a zkouška tahem.

K ověření struktury byl pak proveden metalografický výbrus. Poté byl experimentálně prověřen i první způsob náhrady (antimonem), který je ze všech navržených způsobů nejlevnější. Odlití bylo provedeno ve školních dílnách v elektrické indukční peci.

Naměřené hodnoty byly statisticky zpracovány podle vzorců (4.1.1) a (4.1.2).

Výběrový aritmetický průměr:

$$X = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1.1)$$

Směrodatná výběrová odchylka:

$$S = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.1.2)$$

## 4.2. Prověření původního brzdového kotouče s legurou Mo

### 4.2.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Cílem bylo ověření tvrdosti odlitku brzdového kotouče. Předepsaná tvrdost kotouče je  $195 \pm 25$  HB. Zkouška probíhala ve školních dílnách a bylo provedeno celkem 12 měření. Měřila se tvrdost brzdového kotouče na ploše, z které byla nejprve osoustružená tenká vrstva- takzvaná kůra. Tvrdost byla měřena předepsanou kuličkou o průměru  $D = 5$  mm a zatěžující silou 750 kilopondů, což odpovídá zatěžující síle 7,355 kN, působící po dobu 10 - 15 s. Výsledky jsou uvedeny v tab.4.2.1.

Tab.4.2.1. Tabulka naměřených tvrdostí HB

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Tvrdost (HB)	189	189	191	191	185	192
Číslo měření	7	8	9	10	11	12
Tvrdost (HB)	193	190	191	188	192	194
Průměrná tvrdost x:	190,42					
Směrodatná odchylka s:	$\pm 2,43$					

Naměřená tvrdost tedy byla 190 HB 5/750. Tato hodnota nám splňuje předepsanou hodnotu  $195 \pm 25$  HB.

### 4.2.2 Zkouška pevnosti mezi klíny

Cílem této zkoušky bylo ověřit pevnost mezi klíny, která byla předepsána na 130-160 Mpa. Zkouška byla provedena přímo ve firmě Škoda Auto a.s. na stroji KDG 3/3. Zkouška pevnosti mezi klíny je zkouškou nenormalizovanou. Vzorky 1,2 byly odebrány z plochy, na které se upíná kotouč šrouby. Další vzorky byly odebrány z plochy brzdové o velikosti 20x25 mm o tloušťce 5 mm. Bylo provedeno celkem 8 měření. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab.4.2.2.

Tab.4.2.2. Tabulka naměřených pevností mezi klíny

číslo vzorku	rozměr a (mm)	rozměr b (mm)	rozměr c (mm)	plocha S (mm <sup>2</sup> )	Síla F (kN)	pevnost (MPa)
1	25	20	5	100	15,95	159,5
2	25,05	20,05	5	100,25	16,07	160,3
3	25	20,1	5,05	101,51	17,16	169,06
4	25	20	5	100	15,87	158,7
5	25,1	20,05	5,05	101,25	16,51	163,06
6	25,05	20,05	5	100,25	16,25	162,09
7	25	20	5	100	14,54	145,4
8	25,05	20,1	5	100,5	14,29	142,19
<b>Průměrná hodnota x :</b>					15,83	<b>157,54</b>
<b>Směrodatná odchylka s:</b>					± 9,10	

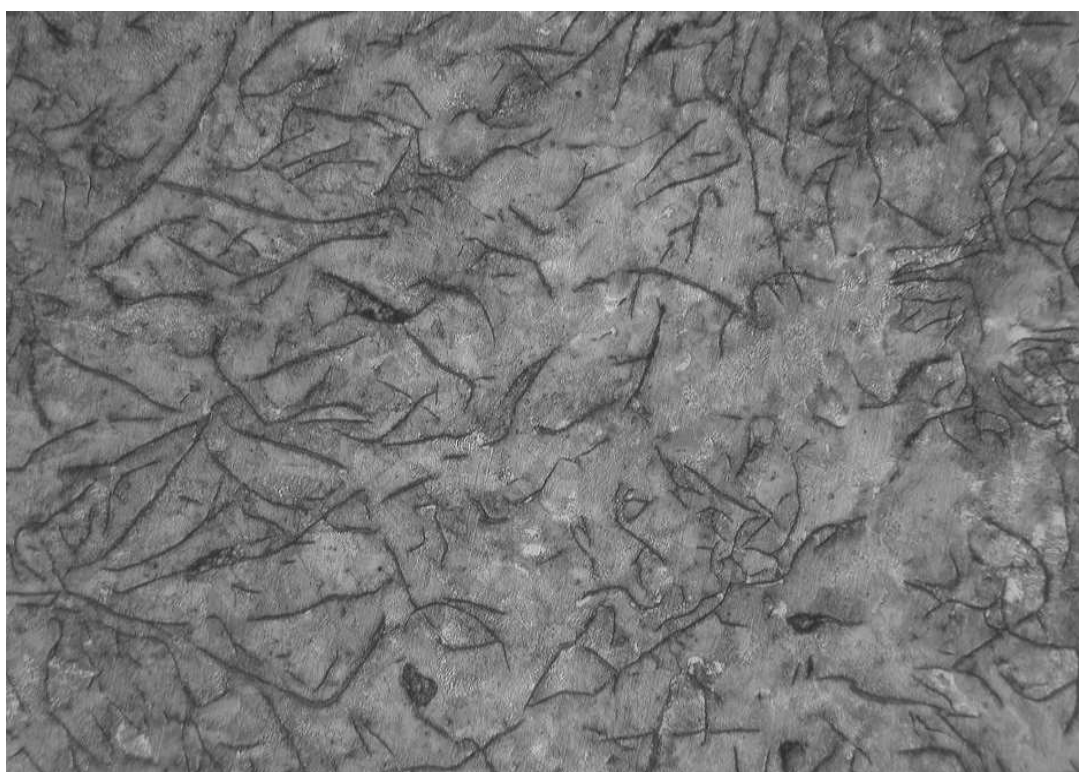
Pro odlitky byla předepsána pevnost mezi klíny 130-160 Mpa. Tato hodnota byla splněna u všech 8 zkušebních vzorků. U většiny vzorků byla hodnota u horní hranice 160 Mpa a u některých byla hranice 160 Mpa dokonce výrazně převýšena. Průměrná síla potřebná k přelomení vzorečku byla 15,83 kN a průměrná pevnost mezi klíny pak 157,54 Mpa. Můžeme tedy říci, že předepsaná pevnost mezi klíny je splněna.

### 4.2.3 Zkouška tahem

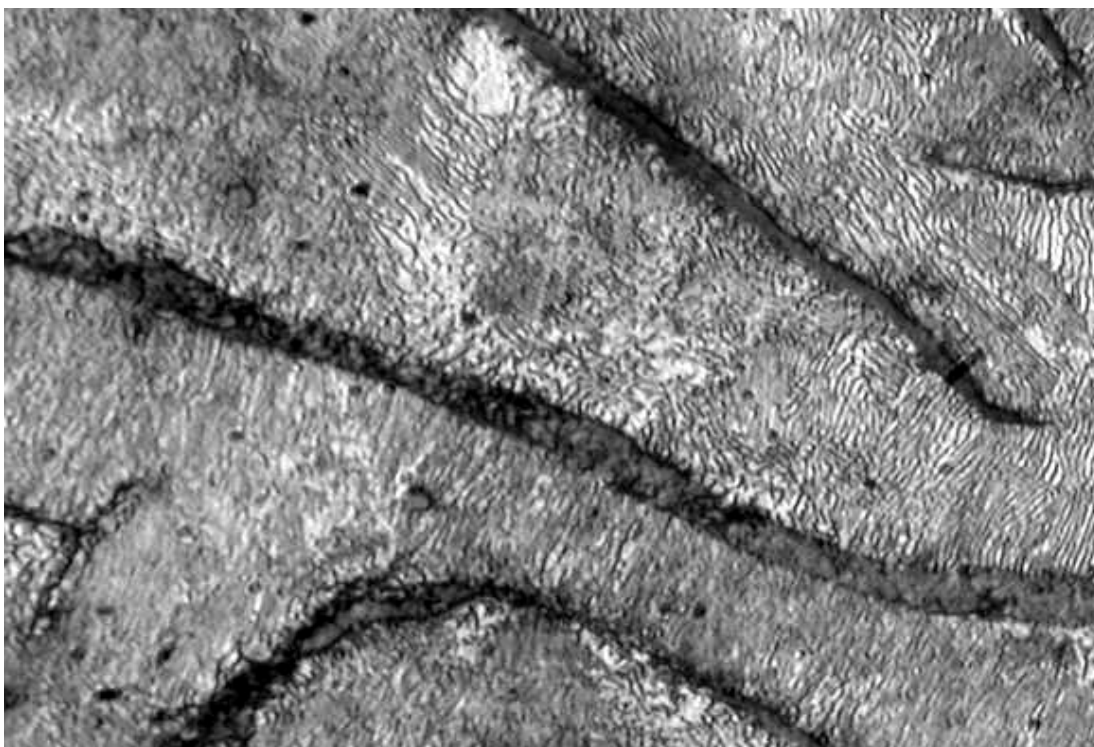
Cílem zkoušky tahem bylo prověřit mez pevnosti v tahu  $R_m$ . Ta byla předepsána na 180-230 Mpa. Zkouška byla uskutečněna na zkušební tyčce získané z brzdového kotouče. Byla provedena ve školních dílnách na zkušebním vzorku o průměru  $\varnothing 8$  mm a délky 40 mm. V tomto případě bylo cílem zjistit a prověřit pouze mez pevnosti v tahu. Mez pevnosti v tahu byla změřena 196,99 Mpa. Tato hodnota odpovídala předepsané hodnotě 180-230 Mpa. Další údaje nebyly potřebné, a proto nebyli ani zjišťované. Tato zkouška je spíše jen jako doplňková, protože byla provedena na vzorku odebraném přímo z odlitku brzdového kotouče. Správně by měl být vorek získán odlitím zkušební tyčky, ty se však ve Škoda auto a.s. neodlévají. Proto je výsledek této zkoušky jen orientační.

#### 4.2.4 Metalografický výbrus

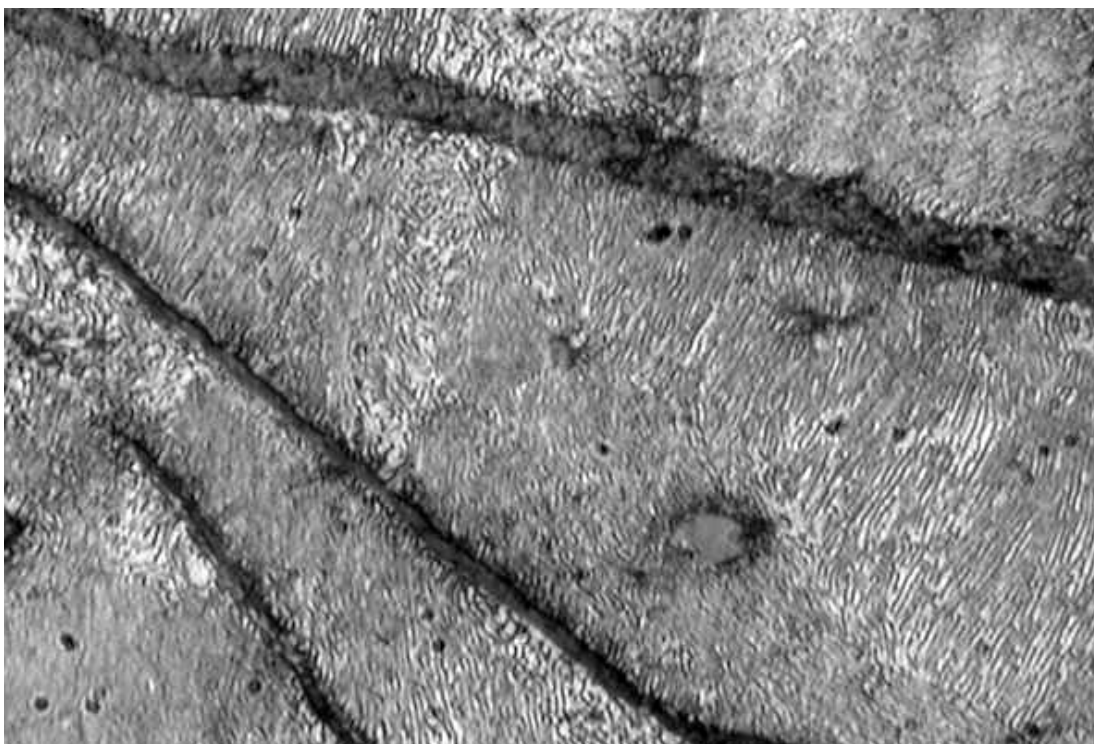
Metalografický výbrus byl proveden k ověření struktury kotouče. Cílem bylo zejména ověřit procentuální obsah perlitu ve struktuře, který má být vyšší než 90 %. Podíl feritu by pak měl být menší než 10 %. Výbrus byl proveden na vzorku odebraném z brzdové části kotouče. Výbrusu byl proveden ve školních dílnách, dělení vzorku proběhlo na pile MIKRON 150. Následné zalisování, ke kterému byla použita směs dentakrylu a bakelitu, bylo provedeno na stroji SIMPLIMET 1000 od firmy Buehler. Následovalo ruční vybroušení a naleptání.



*Obr.4.2.4.1. Mikrostruktura odlitku brzdového kotouče – zvětšení 100x, leptadlo NITAL*



*Obr 4.2.4.2. Mikrostruktura odlitku brzdového kotouče – zvětšení 500x,  
leptadlo NITAL*



*Obr.4.2.4.3. Mikrostruktura odlitku brzdového kotouče – zvětšení 500x,  
leptadlo NITAL*

### 4.3 Prověření náhrady antimonem

Navržené složení při tomto způsobu je v tab.3.4.2.2. K odlití zkušebních vzorků došlo ve školních dílnách (katedra strojírenské technologie) v EIP. Bylo využito 20 kg vratného materiálu (nálitky) ze Škody Auto a.s. Tento vratný materiál obsahoval 3,5 % Si a 2,4% C. Ke snížení obsahu křemíku na předepsané složení došlo pomocí 8,5 kg ocele 11373 ve formě plechu, který obsahuje 0,2 % C a 0,4 % Mn. Složení vsázky je uvedené v tab. 4.3.1. Bylo použito očkovadla superseed 75. Jedná se o obchodní název očkovadla, které obsahuje 75 % Si, 0,1 % Ca, 0,6-1 % Sr a 0,5 % Al. K odlití do forem došlo při teplotě 1450 °C.

*Tab.4.3.1. Složení vsázky*

Materiál	GJL	ocel 11373	FeCr(60%)	Ni	FeSi(75%)
Hmotnost (kg)	20	8,5	0,095	0,06	0,076
Materiál	C	FeMn(70%)	Cu(95%)	SbCu(50%)	
Hmotnost (kg)	0,38	0,325	0,1	0,034	

Z této vsázky byly odlity destičky o různých tloušťkách, z kterých následně byly získány vzorky k provedení jednotlivých zkoušek. Odlité složení bylo zjištěno na kvantometru ve Škoda Auto a.s. Výsledky jsou uvedeny v tab.4.3.2.

*Tab.4.3.2. Chemické složení odlitých destiček*

Legura	C	Si	Mn	S	P	Mo	Al
Obsah	3,4	2	1,08	0,018	0,034	0,006	0,003
Legura	Cr	Cu	Ti	Ni	Sb	Sn	
Obsah	0,25	0,46	0,018	0,22	0,049	0,005	

Pokud získané složení porovnáme s navrženým složením, které je uvedeno v tab.3.4.2.2, zjistíme že výsledné složení obsahuje o 0,2 % C méně. Tento fakt je pravděpodobně způsoben částečným vypálením uhlíku. Na druhé straně došlo ke zvýšení Si o 0,3 %, zřejmě vyšším přídatkem očkovadla, než s kterým bylo původně počítáno.

Zvýšení obsahu v řádech setin je i u přidávaných legur Cr, Cu, Ni. Tyto drobné odchylky byli zřejmě způsobeny malým obsahem těchto prvků ve vratném materiálu (nálitkách). K výraznější odchylce došlo pouze v případě manganu, který



se oproti původně navrženému složení liší o 0,28 %. Tato nepřesnost mohla být způsobena buď obsahem manganu ve vratném materiálu nebo jiným obsahem manganu v plechách, než který byl zjištěn. Popřípadě mohlo dojít k nepřesnosti při vážení. Zvýšení manganu by však nemělo mít na vlastnosti odlitých vzorků výrazný vliv. Obsah Sb byl předepsán na 0,06 %. Při tomto obsahu dosahuje litina nejlepších mechanických vlastností. Obsah v odlitých vzorcích je o setinu nižší, to je způsobeno opět buďto propalem, popřípadě nepřesností při odvažování.

Mimo prvků, které byli přidány jako legující prvky, se ve struktuře objevují i další prvky (Mo, Al a Sn), které jsou ve složení pouze v řádech tisícín. Tato množství nemají na vlastnosti odlitých vzorků žádný vliv.

### 4.3.1 Zkouška tvrdosti dle Brinella

Cílem zkoušky bylo ověřit předepsanou tvrdost  $195 \pm 25$  HB. Zkouška byla provedena ve školních dílnách a bylo provedeno celkem 12 měření. Tvrdost byla měřena na odlité destičce o tloušťce 12 mm kuličkou o průměru  $D = 5$  mm a zatěžující silou 750 kilopondů (7,355 kN) působící po dobu 10 – 15 s. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tab.4.3.1.

*Tab.4.3.1. Tabulka naměřených tvrdostí HB*

<b>Číslo měření</b>	1	2	3	4	5	6
<b>Tvrdost (HB)</b>	229	217	213	224	215	217
<b>Číslo měření</b>	7	8	9	10	11	12
<b>Tvrdost (HB)</b>	217	209	213	215	224	217
<b>Průměrná tvrdost x:</b>	<b>217,5</b>					
<b>Směrodatná odchylka s:</b>	<b><math>\pm 5,58</math></b>					

Naměřená tvrdost byla 217,5 HB 5/750. Tato hodnota  $217,5 \pm 5,58$  se dostává nad předepsanou hodnotu.

### 4.3.2 Zkouška pevnosti mezi klíny

Cílem této zkoušky bylo ověřit pevnost mezi klíny, která byla předepsaná na 130 - 160 Mpa. Jednotlivé vzorky byli získány obráběním z odlitých destiček.

Zkouška byla provedena ve firmě Škoda Auto a.s. Bylo vyzkoušeno celkem 8 vzorků o rozměru 20x25 mm a tloušťce 5 mm. Naměřené hodnoty jsou v tab.4.3.2.

*Tab.4.3.2. Tabulka naměřených pevností mezi klíny*

<b>číslo vzorku</b>	<b>rozměr a</b> (mm)	<b>rozměr b</b> (mm)	<b>rozměr c</b> (mm)	<b>plocha S</b> (mm <sup>2</sup> )	<b>Síla F</b> (kN)	<b>pevnost</b> (MPa)
1	25	20,1	5,05	101,51	17,4	171,41
2	24,9	19,9	5	99,5	20,7	208,05
3	24,95	20	5	100	20,6	206
4	25	19,85	5	99,25	19,7	198,49
5	25,05	19,9	5	99,5	19,6	196,98
6	25	20,1	5,05	101,5	18,6	183,25
7	25,05	20,1	5	100,5	18,4	183,08
8	25	20,1	5	100,5	15,4	153,24
<b>Průměrná hodnota x :</b>					18,8	<b>187,56</b>
<b>Směrodatná odchylka s:</b>					± 18,69	

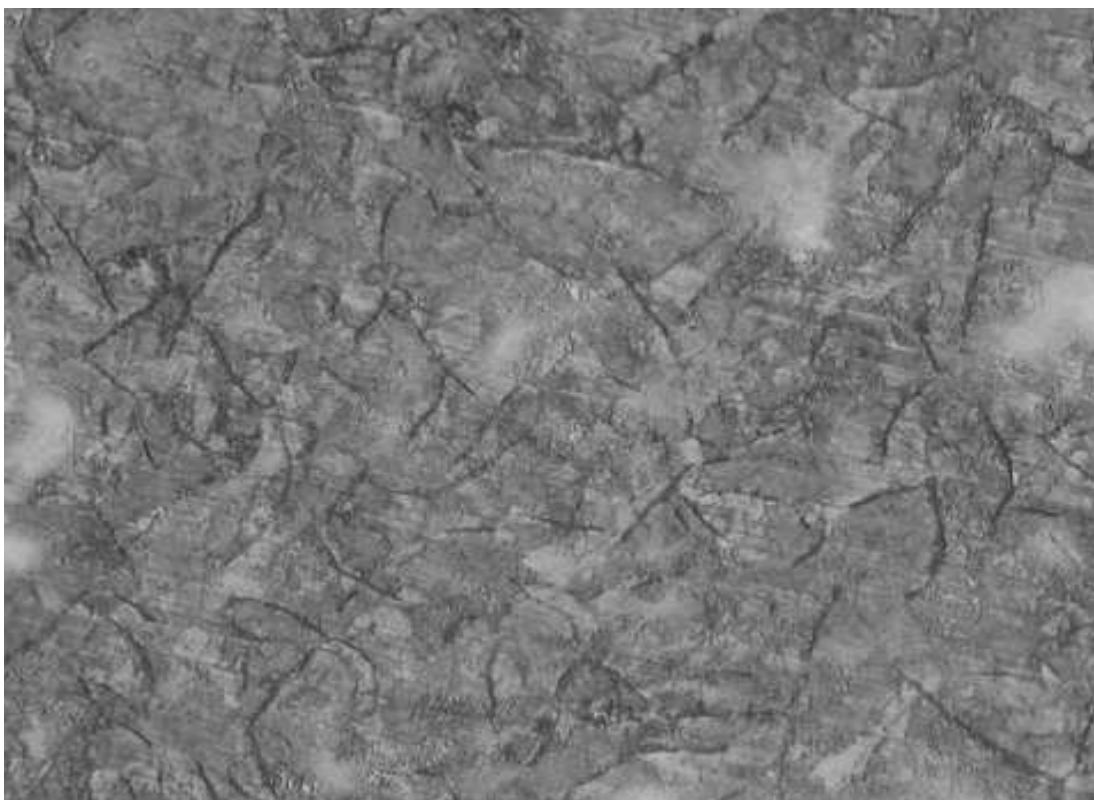
Pevnost mezi klíny při náhradě antimonem je 187,56 Mpa. Tato hodnota převyšuje předepsanou hodnotu 130-160 Mpa.

### 4.3.3 Zkouška tahem

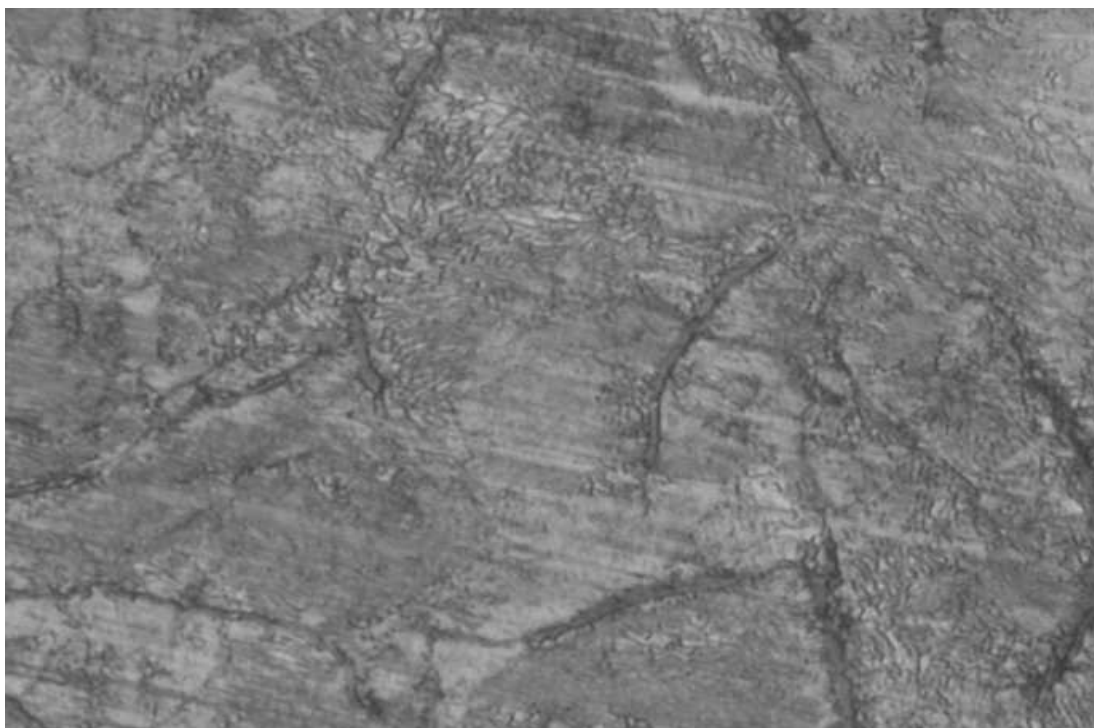
Cílem zkoušky bylo prověřit mez pevnosti v tahu  $R_m$ . Ta byla předepsána na 180-230 Mpa. Zkouška byla uskutečněna na zkušební tyčce získané z odlitých vzorků. Byla provedena ve školních dílnách na zkušebním vzorku o průměru  $\varnothing 8$  mm a délky 40 mm. Cílem bylo opět zjistit pouze mez pevnosti v tahu. Další údaje nebyly zjišťovány. Stejně tak jako u zkoušky tahem původního materiálu je výsledek zkoušky pouze orientační, protože zkušební vzorek nebyl odlit, ale získám obráběním z odlité destičky. Mez pevnosti v tahu byla zjištěna 285 Mpa. Tato hodnota tedy výrazně převyšuje předepsanou hodnotu 180-230 Mpa.

### 4.3.4 Metalografický výbrus

Metalografický výbrus byl proveden k ověření struktury odlitých vzorků. Cílem bylo zejména ověření procentuálního obsahu perlitu ve struktuře, který má být vyšší než 90 %. Výbrus byl proveden ve školních dílnách za stejných podmínek, které byly i u výbrusu původního složení. Ty jsou popsány v kapitole 4.2.4.



*Obr.4.3.4.1. Mikrostruktura litiny při náhradě antimonem – zvětšení 100x, leptadlo NITAL*



*Obr.4.3.4.2. Mikrostruktura litiny při náhradě antimonem – zvětšení 500x, leptadlo NITAL*



*Obr.4.3.4.3. Mikrostruktura litiny při náhradě antimonem – zvětšení 500x,  
leptadlo NITAL*

Jak je vidět na obr.4.3.4.1. tak struktura při nahrazení antimonem je v celém průřezu perlitická. Dále je na obr 4.3.4.1. a obr.4.3.4.3. možné na některých místech pozorovat steadit neboli fofidické síťoví (bílá místa).

## 5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

V experimentální části byl prověřen odlitek brzdového kotouče s legurou molybdenem. Následně došlo k prověření náhrady molybdenu antimonem. Při porovnání výsledků těchto dvou složení zjistíme, že u náhrady antimonem došlo ke zvýšení všech porovnávaných mechanických vlastností. Výsledky jednotlivých zkoušek jsou v tab.5.

*Tab.5. Zjištěné mechanické vlastnosti*

Zkouška	Původní složení s Mo	Náhrada antimonem
Tvrdost (HB)	190,42	217,5
Pevnost mezi klíny (Mpa)	157,54	187,56
Rm (Mpa)	196,99	285

Ke zvýšení vlastností došlo zejména díky lamelárnímu perlitu, který je v celém průřezu, jak je vidět na metalografických výbrusech. Perlitické struktury bylo dosaženo i přesto, že obsah antimonu ve struktuře je pouze 0,049 % oproti původně navrženému 0,06 %. Pokud by struktura, která byla odlita byla totožná s navrženým složením, pravděpodobně by nedošlo k tak výraznému zvýšení mechanických vlastností a naměřené hodnoty by byly o něco nižší. Výrazné zvýšení vlastností je způsobeno zřejmě zvýšeným obsahem křemíku (z 1,7 % na 2 %), dále pak zvýšením manganu (z 0,8 % na 1,08 %). Nejvíce je pak ovlivněno zvýšením chromu na 0,25 %. Vlivem zvýšení chromu tak nebyl dodržen poměr mezi Cu:Cr, který má být 2 - 4 :1. Tímto došlo k aktivitě chromu, který podporuje vznik fosfidického síťoví – steadit. To je vidět i na některých místech metalografických výbrusů – obr.4.3.4.1. a obr.4.3.4.3. Steadit je značně tvrdý a křehký, avšak výrazně snižuje houževnatost a obrobitelnost.

## 6.ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně prověřit odlitky brzdových kotoučů a následně teoreticky analyzovat možnosti náhrady molybdenu v brzdových kotoučích včetně ekonomické analýzy.

V části teoretické je obsažena základní teorie litin. Největší prostor je věnován litině s lupínkovým grafitem a vlivu jednotlivých prvků na vlastnosti této litiny. Následuje teoretický rozbor složení původního složení odlitku brzdového kotouče s legurou molybdenem. Poté byly teoreticky analyzovány možnosti náhrady molybdenu. Byly navrženy celkem čtyři možné náhrady (antimonem, cínem, vanadem a zvýšeným obsahem chromu). U všech náhrad se nejedná pouze o nahrazení prvku za prvek, ale o změny celého složení litiny.

Poté byla provedena ekonomická analýza všech navržených způsobů náhrady, to znamená že došlo k výpočtu cen legur vztažených na 1 kg. U všech způsobů náhrady došlo ke snížení cen. Nejvýraznější je u náhrady antimonem (z 9,03 Kč u původního složení na 2,45 Kč). V experimentální části byl prověřen odlitek brzdového kotouče. Byla provedena zkouška pevnosti mezi klíny, Brinellova zkouška, zkouška tahem a metalografický výbrus. Poté následovalo odlití nejlevnějšího způsobu náhrady (antimonem) ve školních dílnách. Na odlitých vzorcích byly provedeny stejné zkoušky jako u původního odlitku.

Všechny zjištěné hodnoty u náhrady antimonem dosahují výrazně vyšších hodnot než u původního odlitku, zároveň také převyšují i předepsané hodnoty. To má za následek zhoršení obrobitelnosti. Tento fakt je jednak způsoben zvýšením legur (Si, Mn, Cr) a také výskytem tvrdého a křehkého steaditu [7]. K jeho vzniku dochází již při obsahu fosforu nad 0,02 %. U odlitého složení byl obsah fosforu 0,034 %. Důvodem, proč je ve struktuře mnohem více steaditu, než u původního odlitku brzdového kotouče je pravděpodobně chrom. Ten by měl být ve struktuře vázán na měď v poměru (2 – 4):1, což v tomto případě nebylo dodrženo, pravděpodobně nízkým obsahem chromu v nálitcích, se kterým při přípravě tavby nebylo počítáno. Pokud by došlo k přesnému odlití navrženého složení, zřejmě by došlo k poklesu výsledků. I tak by měli mechanické vlastnosti odpovídat předepsaným hodnotám. Pokud by i poté byla tvrdost nad předepsanou hranicí, následovalo by zvýšení obsahu síry z předepsaných 0,04 % na původní hodnotu 0,12 %. Ta by zajistila snížení tvrdosti a zlepšení obrobitelnosti.

Pokud by bylo navržené složení použito na výrobu brzdových kotoučů ve Škoda Auto a.s., bylo by potřeba odlít a prověřit navržené složení přímo ve Škoda auto a.s. Jedna proto, aby došlo k odlití přesného složení, které nelze při tak malé tavbě zajistit a jednak proto, že ve školních dílnách jsou jiné podmínky při tavení. Například ochlazovací rychlost, formovací směs atd.

## 7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Alaxin, J.: Nauka o materiálu. VÚT Liberec, 1989.
- [2] Boucník, P.: Vše, co jste chtěli vědět o litinách. Dostupné na internetové stránce [www.boucnik.cz](http://www.boucnik.cz)
- [3] Firemní podklady firmy Škoda Auto a.s.
- [4] Hluchý, M. – Kolouch, J.: Strojírenská technologie 1. SCIENTIA, Praha, 1998.
- [5] Hospodářské noviny – příloha obchod
- [6] Internetové stránky, <http://amm.com>
- [7] Internetové stránky, <http://cs.wikipedia.org/wiki/molybden>
- [8] Internetové stránky, <http://student.ptonline.org/download>
- [9] Internetové stránky, <http://www.metalprices.com>
- [10] Karsay, S.: Tvárná litina I. Výroba. QIT-FER ET TITANE INC, Fompex, s.r.o., Trenčín, 1996.
- [11] Roučka, J.: Metalurgie litin. [Skripta]. VUT Brno, 1998
- [12] Slovák, S.: Metalurgie litin, 2 část. Tavení litin, Vysoká škola báňská, 1976

## **Prohlášení**

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum: 25.5.2006

Podpis:



## **Declaration**

I have been notified of the fact that Copyright Act No.121/2000 Coll. Applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis of grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact: in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledges sources and on the basis of consultation with the heas of the thesis and a consultant.

Date: 25.5.2006

Signature:



